

関西電力株式会社 納

黒部川水系発電所の自動水位制御装置

Water-level Control Equipment for Kurobegawa No. 2 and Shinkurobegawa No. 2 Hydro-power Stations

守田 光 良* 橋本 亮 一*
Mitsuyoshi Morita Ryôichi Hashimoto
鈴木 正 義** 松本 征 文**
Masayoshi Suzuki Masafumi Matsumoto

要 旨

一つの水系に沿って、直列に設置された発電所の運転は、上流発電所の負荷変化と調整池水位を監視しながら行なわれねばならない。
関西電力株式会社、新黒二、黒二発電所に設置された自動水位制御装置はこれを自動化したもので、運転の手数を省くとともに、今まで困難であった小容量調整池をもつ発電所のピーク運転を可能にした。納入以来ほぼ1年になるが、好調に運転を続けている。本文では制御方式、装置の概要、現地試験結果について述べる。

1. 緒 言

関西電力株式会社、黒部川水系には、最上流の黒四発電所から下流へ向かって、黒三、新黒三、黒二、新黒二、柳河原の各発電所が、直列および並列に設置されている。このような直並列水系では、給電要求に応じて負荷を調整する場合、最上流の黒四発電所で、まず負荷をとり、その放流が順次下流へ到達するのをまって、下流発電所の負荷を制御している。したがって調整池容量が小さい下流発電所では、急速に変化する流量(特にピーク時)に追従し、無効放流を生じないように調整しながら運転しなければならない。この制御を自動的に行なうのが自動水位制御装置である。特に将来、発電所を無人化する場合には、欠くことはできないものである。
この自動水位制御装置は、昭和38年黒三発電所に次いで、昭和41年10月、新黒二発電所にそれぞれ設置され、黒部水系の日々の水系

運用に大きな効果をあげている。本文では、水系が複雑で制御がめんどろな、黒二、新黒二発電所の制御装置について、方式、装置の概要および運転結果について述べる。

2. 制御水系の特性

図1は水系の概要である。最上流の黒四発電所の放流は、新設の新黒三、新黒二発電所で次々と発電をしたのち、黒部本流に放流され猫又ダムを経て柳河原発電所へ導水されている。一方、黒四ダムの放流並びに黒四発電所放流量のうち、新黒三使用水量を差し引いた流量と途中の溪流から流入する残流は、新黒三、新黒二の水路と並行して黒部本流を下り、既設の黒三、黒二発電所で発電し、柳河原発電所に至り合流している。いわゆる直並列水系である。
新黒三発電所の放流は、約1kmの無圧水路を通過して連絡水槽へはいり、ここから圧力トンネルで新黒二発電所に導水されている。途中に差動形サージタンクがある。無圧水路の流下時間おくれは約3分である。また、連絡水槽は有効貯水容量が小さく、新黒二発電所を最大出力で運転すると流入量がない場合は、数分で空になる。
一方、黒三発電所の放流は、いったん、黒部本流を下り、残流を合わせて小屋平えん堤にはいり、ここから圧力トンネルで黒二発電所へ取水される。途中には水室形サージタンクが設けられている。
表1に調整池容量と発電所設備の概要を示す。

小屋平えん堤の容量は、比較的大きいので、制御上大きな困難はないが、連絡水槽は、有効容量が小さいので、制御にあたっては3分の流下時間おくれと、サージタンクのサージングの影響を考慮しなければならない。

3. 制 御 方 式

3.1 方式の決定

流入量に応じて発電所を自動運転する方式として、もっとも一般

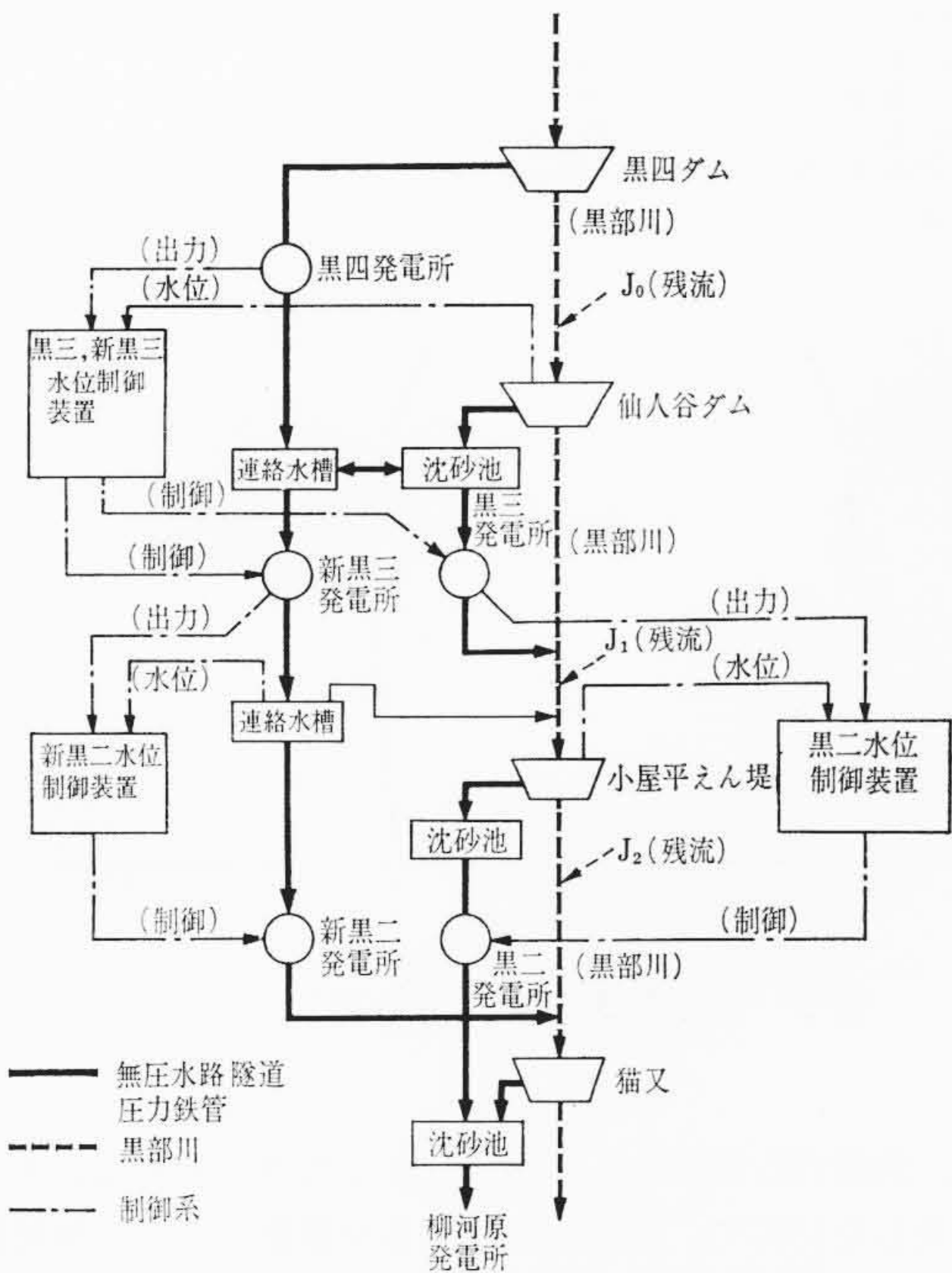


図1 黒部川水系略図(黒二、新黒二発電所まで)

* 関西電力株式会社建設部
** 日立製作所国分工場

発電所名	水 車		発 電 機		有効落差 (m)	最大使用水量 (m ³ /s)	調 整 池	
	最大出力 (kW)	台数	容 量 (kVA)	台数			有効貯水量 (m ³)	利用水深 (m)
新黒二発電所	43,000 (フランス)	1	43,000	1	207	23	約 6,000 (連絡水槽)	
黒二発電所	26,000 (フランス)	3	26,500	3	178.9	47.2 (3台合計)	約 140,400 (小屋平えん堤)	5

新黒二発電所は将来1台増設される。

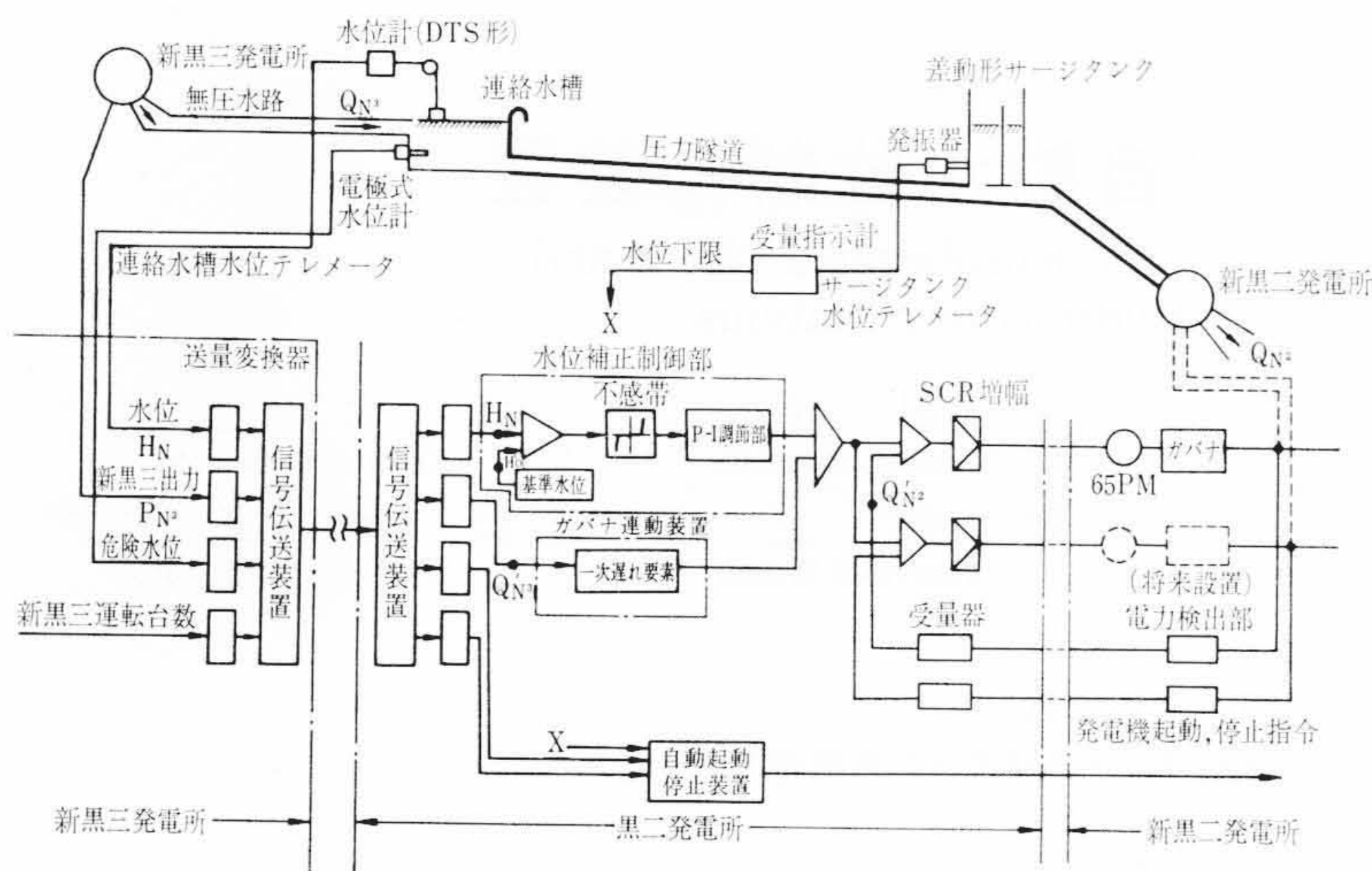


図2 新黒二発電所制御ブロック図

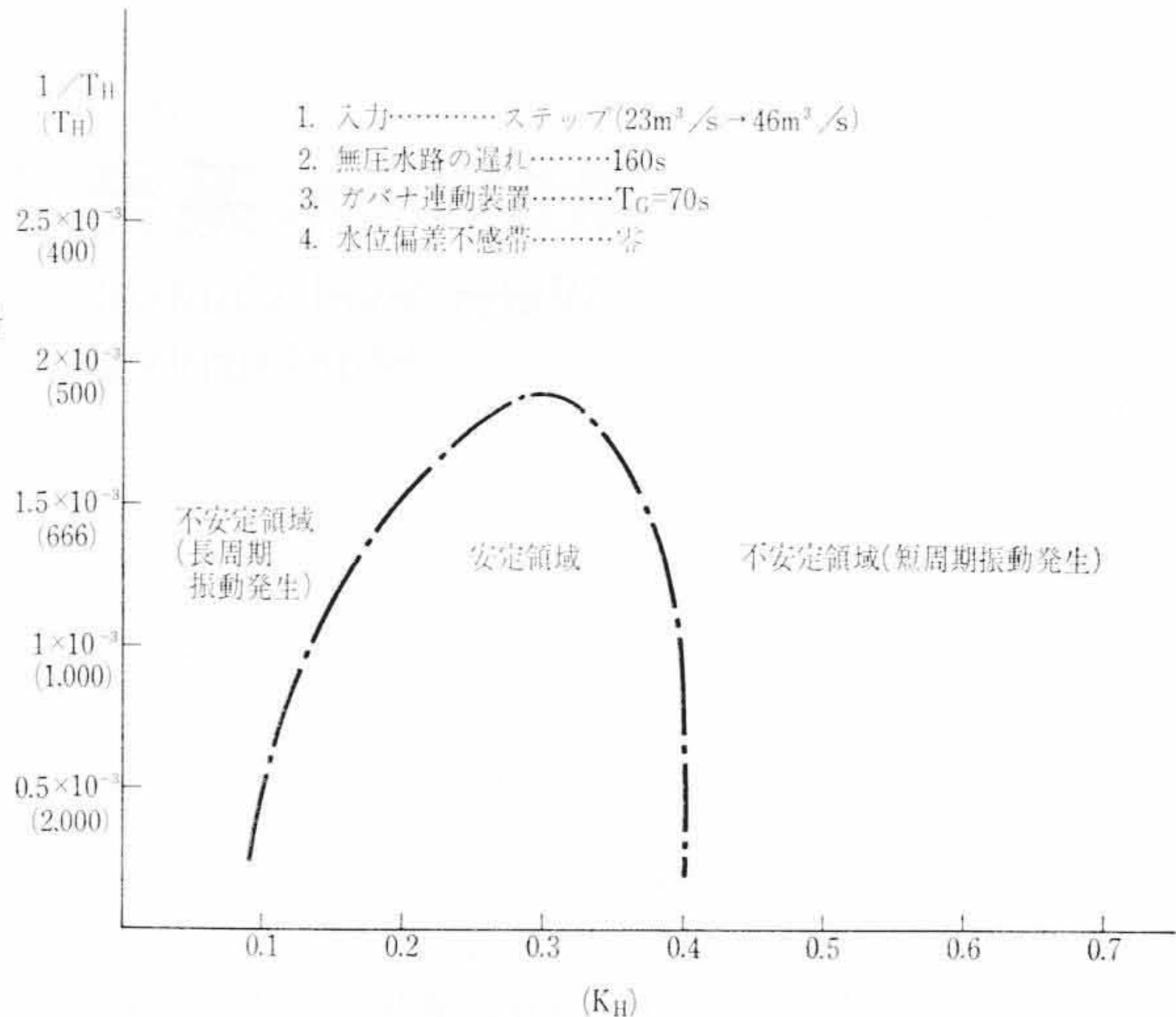


図3 安定制御領域 (case I)

的なのは、レベルガバナー方式である。これは、調整池の水位変化を検出し、変化量に応じて発電機出力を制御するので、

- (1) 上流発電所の出力変化に速応できない。
- (2) サージングによる水位の振動で制御が不安定になる。

などの欠点があるため、このような水系の御制には適用できない。

このため、本装置では、新黒三発電所ですでに実績がある流量平衡制御と水位偏差補正制御を併用する方式を採用した。

流量平衡制御は、連絡水槽の流入量と、流出量を常に等しく保持するよう、下流新黒二の出力を調整するものであり、流量の検出は、発電機出力から電水比で換算している。

水位偏差補正制御は、流下時間おくれ、電水比換算による流量のアンバランスおよび出力変化に伴うサージングによる水位変動が避けられないので、これを補正する目的で水位偏差補正制御を併用し制御の完ぺきを期した。

3.2 アナコンによる検討

この水系は、制御上に制約条件が多いので、詳細なアナコン解析により、制御系の安定性と諸定数を検討した。

3.2.1 安定制御領域

図2に制御ブロック図を示す。水位補正制御は、フィードバック制御系である。この系で自由に選べるパラメータは、比例ゲイン K_H と積分ゲイン $1/T_H$ (T_H は時定数) であるから、これらの値を変えて安定領域を求めた。この結果を図3、図4、図5に示す。この図から、制御に必要な K_H 、 $1/T_H$ の最適値が得られる。

図3は、新黒三発電所放流量を、 $23 \text{ m}^3/\text{s}$ から $46 \text{ m}^3/\text{s}$ に急変した場合 (1台運転から2台運転にした場合に相当する) である。水位偏差感帯をゼロにしてもかなり広い範囲の安定領域をもっている。これは、流量が大きいので圧力トンネルにおける損失が大きく、水位の振動の減衰が速くなるためと考えられる。

図4、図5は、新黒三発電所放流量を $46 \text{ m}^3/\text{s}$ から $23 \text{ m}^3/\text{s}$ に変化した場合 (2台運転から1台運転にした場合) である。図4は、水位偏差感帯をゼロ、図5は、 $\pm 20 \text{ cm}$ にとった場合であるが、感帯がゼロの場合は、安定領域が極端に狭くなる。これは連絡水槽の容量が小さいので、サージングによって水位が変動しやすくなるためである。広い範囲で安定した制御を行なうためには、適度の感帯を設ける必要がある。

3.2.2 ステップ応答

図6はステップ応答の一例である。上流の新黒三発電所の放流量を、0から $23 \text{ m}^3/\text{s}$ (新黒二発電所の最大使用水量) にステップ状に変化させた場合である。立上り時は、連絡水槽までの流下時

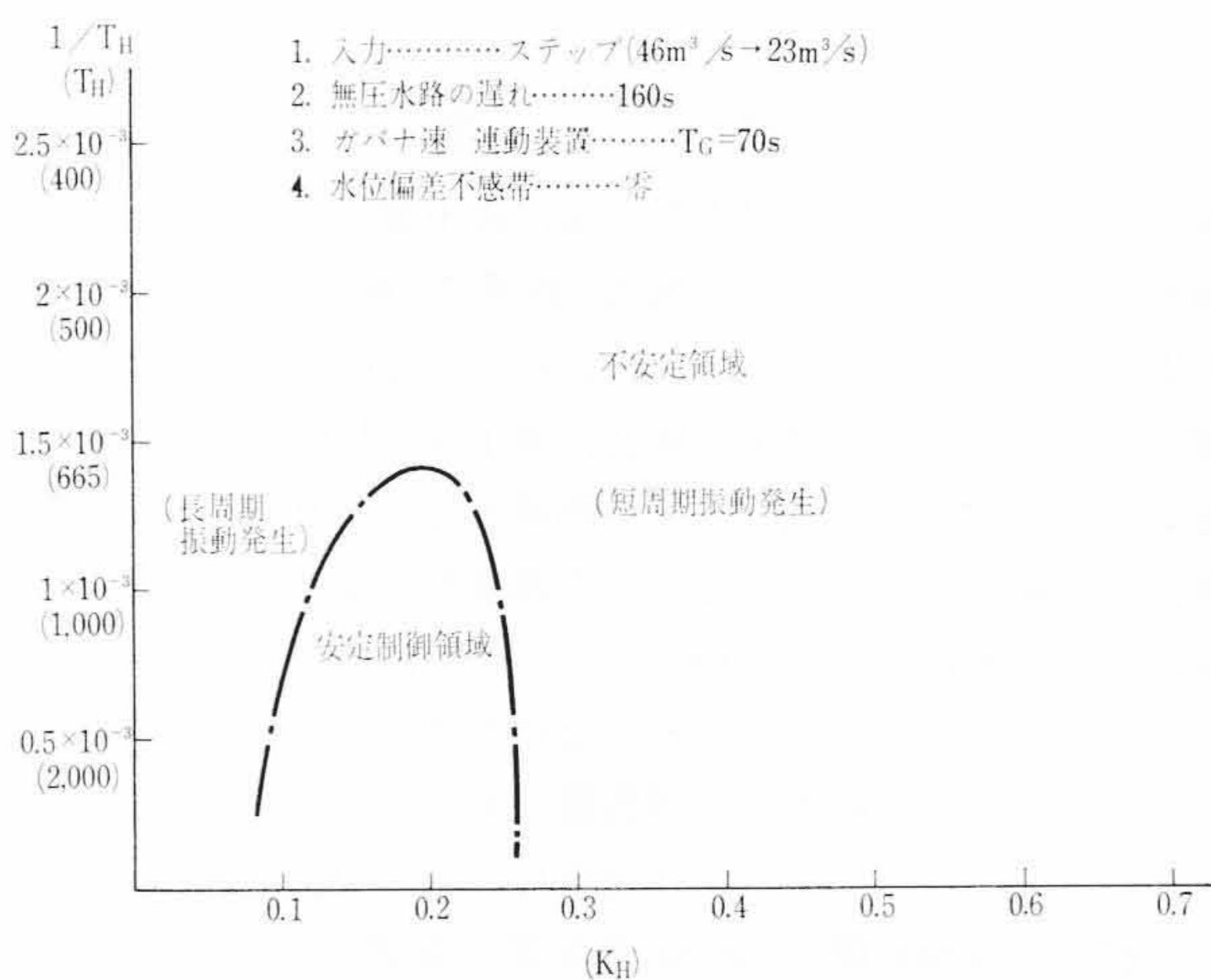


図4 安定制御領域 (case II)

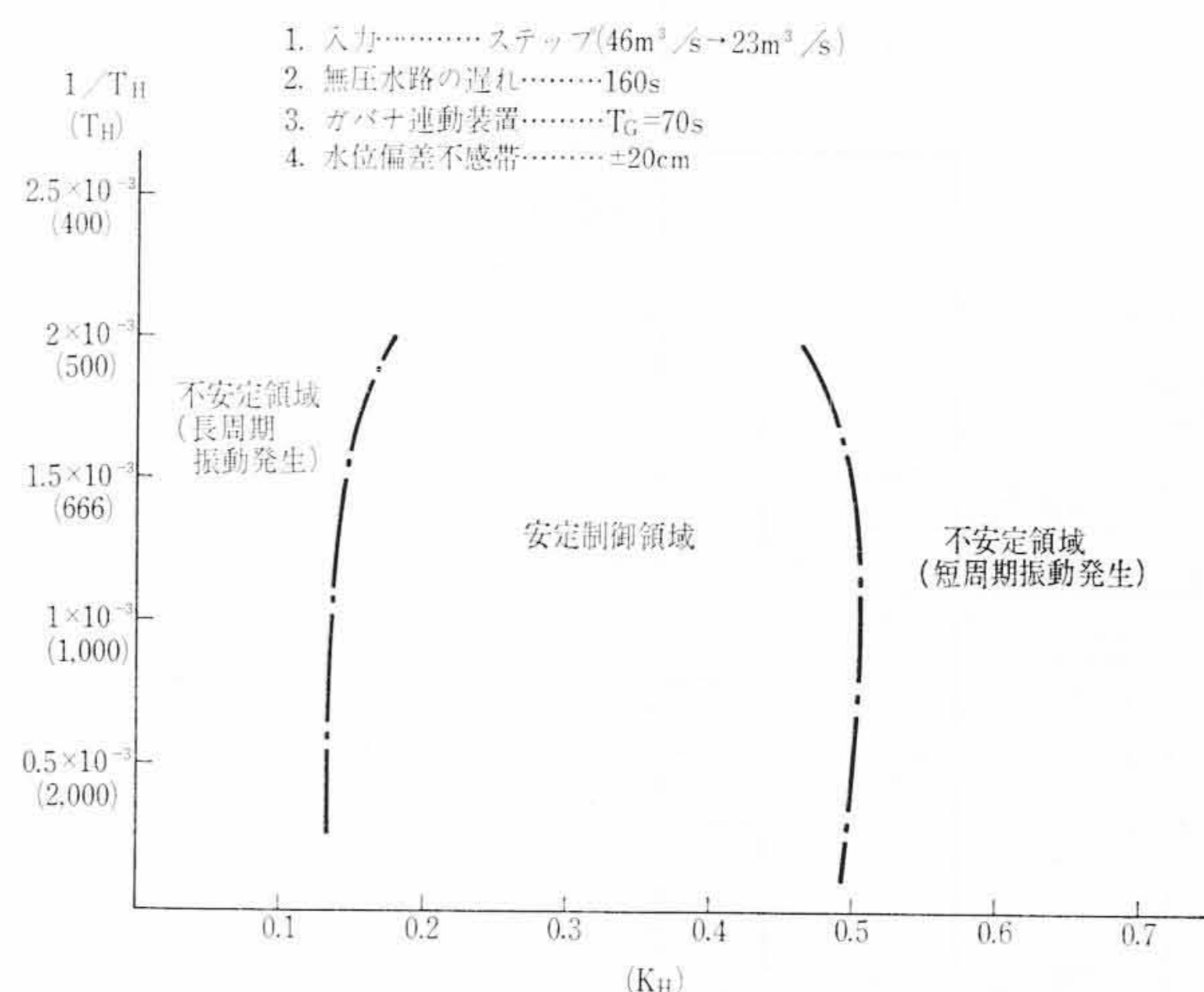


図5 安定制御領域 (case III)

間おくれと、装置内の時間おくれ回路によって与えられた、おくれ特性が一致しないので、水槽水位は、多少振動するが、短時間で定常状態に戻っている。

図7は、黒二発電所のステップ応答例である。この場合は、小屋平えん堤の有効容量が比較的大きいので水位は、なめらかに定常状態に戻っている。

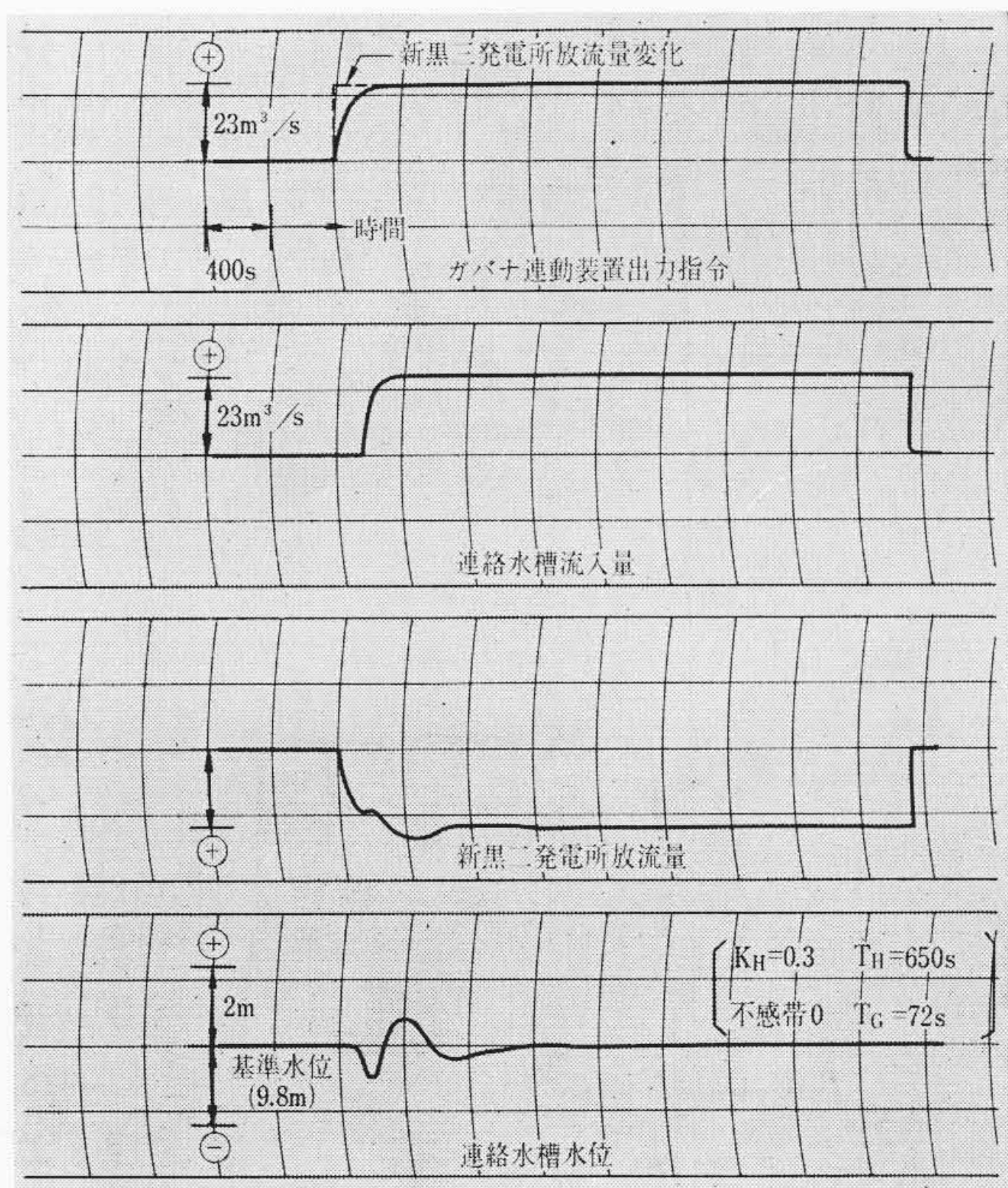


図6 アナコン解析結果 (ステップ応答)

これらの結果から、 K_H 、 $1/T_H$ などの定数を適切にすれば、広い範囲の安定制御領域が得られることがわかる。

3.3 制御動作

3.3.1 新黒二発電所の制御

新黒二発電所の放流量 Q'_{N2} は、テレメータで送られてきた新黒三発電所の出力 P_{N3} から電水比換算により求められる。このため、時間おくれ回路（ガバナー連動装置と呼んでいる）を設け流下時間おくれを補償するとともに Q'_{N3} の変動のうち、短周期成分を除いて制御系を安定化している。 Q'_{N3} と新黒二発電所の放流量 Q'_{N2} （発電機出力を電水比換算したもの）とを比較し、その差がゼロになるように新黒二発電所出力を制御すれば、連絡水槽への流入量と流出量が平衡し、新黒三発電所の出力変化に自動的に追従することになる。これが流量平衡制御であるが実際には、前記の流下時間おくれとこれを補償する時間おくれ回路の設定値とのずれ、および電水比換算による流量の誤差などのため、連絡水槽の水位 H_N が変動するので、 H_N を検出して別に設定した基準水位 H_0 とを比較してその偏差 ΔH を算出する。 ΔH が不感帯を越えれば、 $\Delta H=0$ になるように補正制御を行なう。この制御には $P-I$ 特性をもたせて水位にオフセットが生じないようにしている。制御系が平衡しているときは、次の式が成立する。

連絡水槽水位の平衡から

$$Q_{N3} - Q_{N2} = 0 \quad (1)$$

$P-I$ 調節部積分器の平衡から

$$\Delta H = H_N - H_0 = 0 \quad (2)$$

新黒二発電所出力平衡の条件から

$$\Delta Q_N + Q'_{N3} - Q'_{N2} = 0 \quad (3)$$

電水比換算で求めた流量と実流量との差を ΔQ_{N3} 、 ΔQ_{N2} とすれば、(3)式は次のようになる。

$$\Delta Q_N + (Q_{N3} + \Delta Q_{N3}) - (Q_{N2} + \Delta Q_{N2}) = 0$$

これは(1)式の関係から

$$\Delta Q_N = \Delta Q_{N2} - \Delta Q_{N3} \quad (3')$$

∴ ΔQ_N は ΔH の積分値

すなわち、実測困難な発電機放流量の代わり、出力から電水比換算で求めた放流量を使って制御してもその誤差は積分器が補正し、制御結果に影響を与えず、オフセットが残らない。

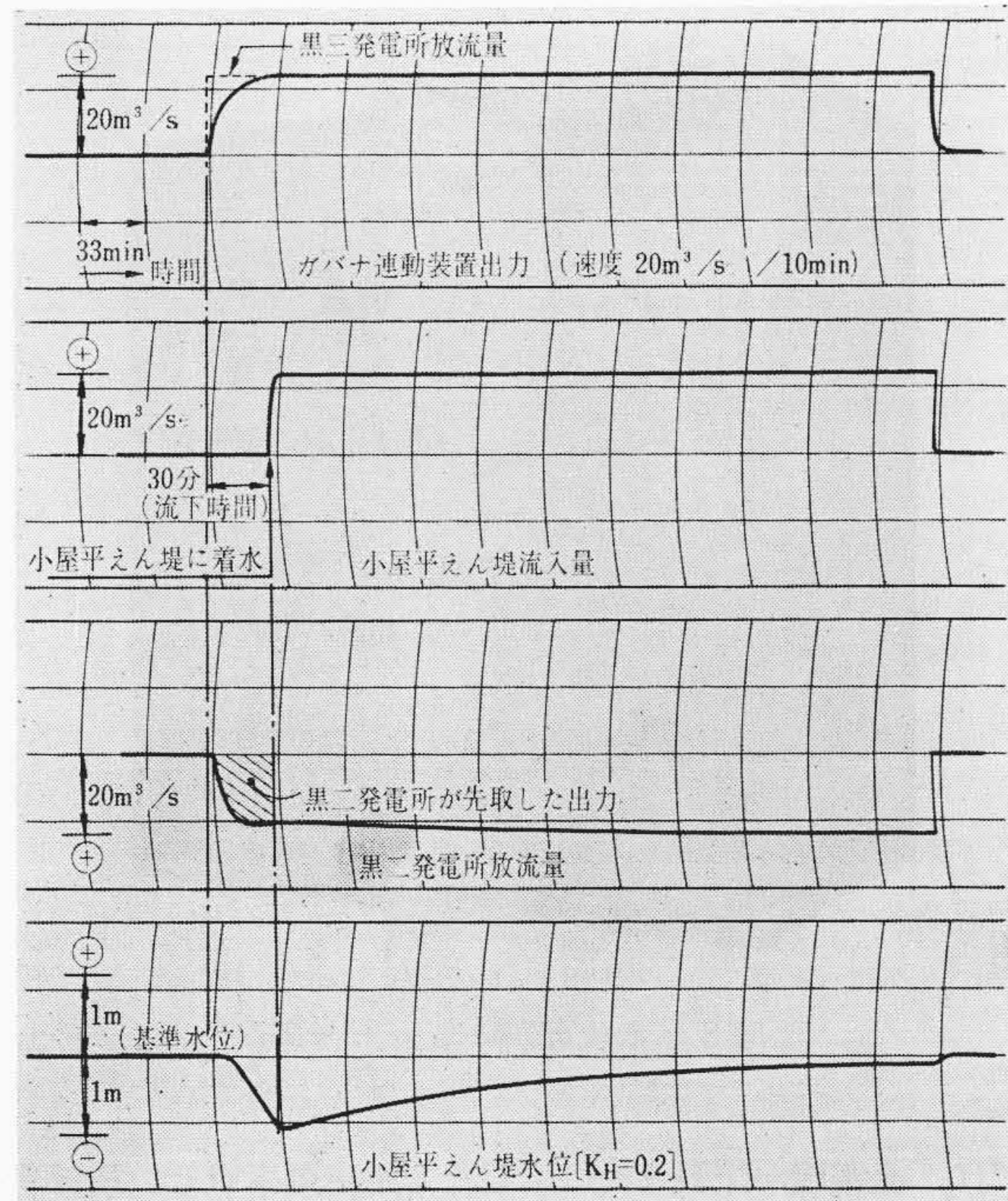


図7 アナコン解析結果 (ステップ応答)

また、直列水系の発電所の運転は、上流発電所の運転台数に合わせて、下流発電所を起動停止しなければならないので、新黒三発電所の運転状況に応じて、自動的に水車を起動停止させる装置を設けてある。これによって運転員の負担を著しく軽減することが可能になった（現在、新黒二の運転は、下流約 500 m 離れた黒三より遠隔制御される無人発電所である）。

3.3.2 黒二発電所の制御

黒三発電所から小屋平えん堤までの流下時間は約 30 分あるので、水が到達してから黒二発電所を制御したのでは、ピーク時の運転に時間的なおくれを生ずる。これを避けるため、小屋平えん堤の有効容量が大きいことを利用して、水の到着前から出力制御を行ないピーク時に有効な運転ができるようにした。すなわち、えん堤水位に一定の許容幅（約 2 m）を与え、水位がこの幅内にあるときは、時間おくれ回路のおくれ時間を小さくして、黒三発電所の放流が到着前に黒二発電所を制御するのであるが、このまま運転を続ければ、水位が許容幅をはみ出してしまうので、この場合は、流量の平衡速度をおそくして水位の変動を制御する。

水位補正制御では、水位が許容幅内にあるときは、補正ゲインを小さくして流量平衡制御を優先させ、許容幅を越せばゲインを大きくして水位補正制御を優先させるようにしてあるが、この場合、単に比例ゲインをあげただけでは、サージタンク水位が振動するので、比例補正信号の速度 ($m^3/s/min$) を押え、無用な振動を生ずることなく、水位を制御できるようにした。

なお、黒二水系では、残流量が大きいので、この変動を自動的に補正できる残流自動補正装置および残流を考慮した高能率運転装置を設けている。以下簡単にこれらの動作を説明する。

(i) 残流自動補正

従来の水位制御では、残流は、予想値によって補正しているが、予想誤差で水位に偏差が生ずる。これを手動で補正していたは、将来、発電所を無人化する場合に支障をきたすので、水位偏差が発生し、一定時間継続したときは、残流が変化したものとして判断して、自動的に残流の設定値を補正するようにした。

(ii) 高能率運転

黒二発電所の運転台数は、黒三発電所の運転台数と、一致するように自動的に起動停止が行なわれるが、残流の大きさによ

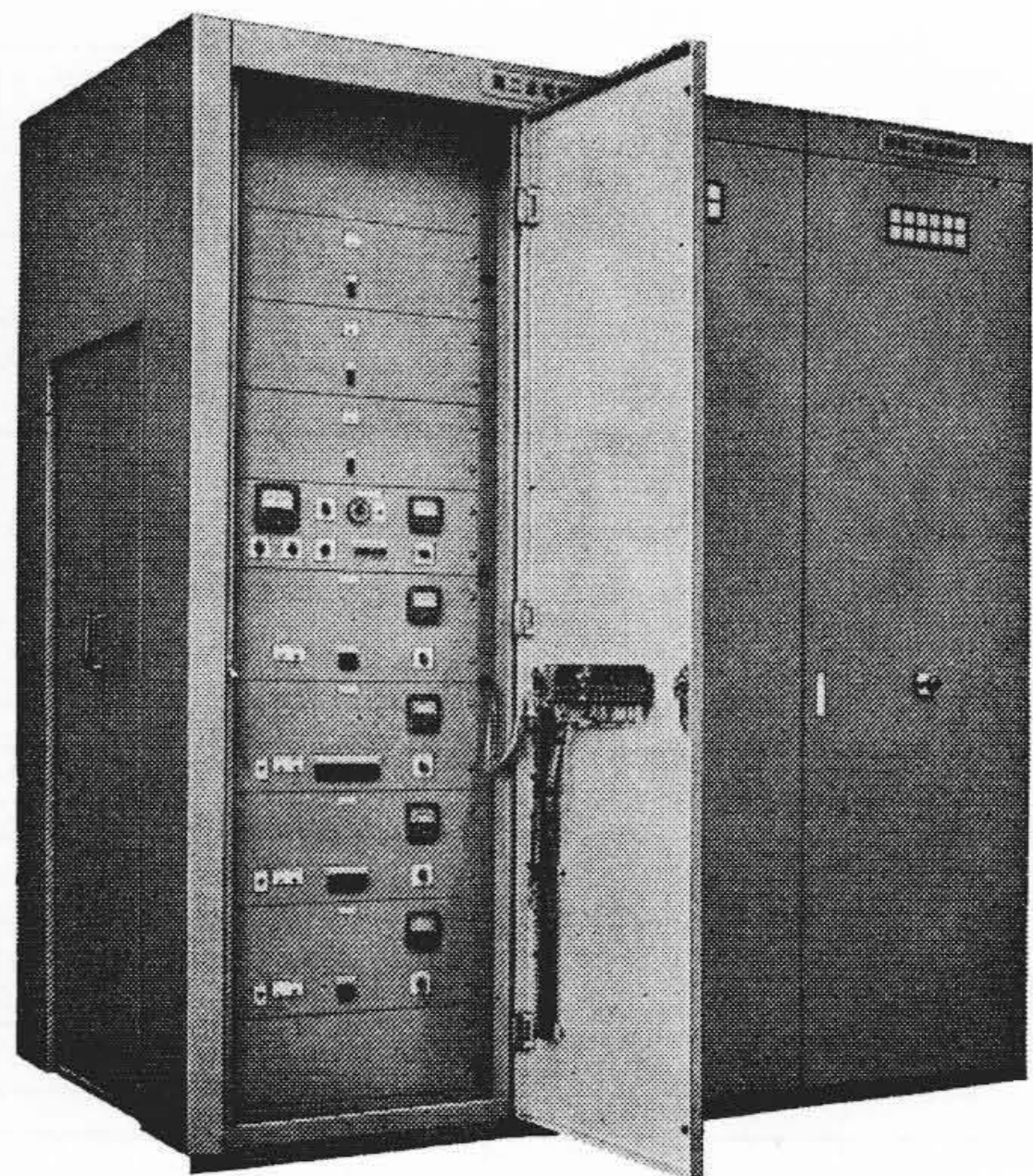


図8 水位制御キュービクル

では、発電機が上限または下限など水車効率の低い所で運転されることもあるので、運転すべき台数を自動的に変更し、効率の高い運転ができるようにした。

装置は、黒三発電所、黒二発電所、新黒二発電所に分散して設置されている。図8は、黒二発電所設置の水位制御キュービクルの外観である。

4. 現地試験結果

図9は昭和41年10月実施された現地試験の結果で新黒二発電所のステップ応答特性を示したものである。新黒三発電所の放流量変化 ($5 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow 48 \text{ m}^3/\text{s}$, $48 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow 5 \text{ m}^3/\text{s}$) に対し、新黒二発電所が急速に追従し、連絡水槽の水位を20 cm程度の変動に押えている。基準水位を越流頂から20 cm下(9.8 m)にして安定に運転できることを示している。

図10は、黒二発電所のステップ応答試験結果である。黒三発電所の放流量 ($1.3 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow 18.5 \text{ m}^3/\text{s}$, $18.5 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow 1.3 \text{ m}^3/\text{s}$) は、約25分後に小屋平えん堤へ到着している。黒二発電所出力は、約12分で黒三発電所出力に追従しており、小屋平えん堤の貯水を活用した効果が現われている。水位変動は、約40 cmに押えられている。水位

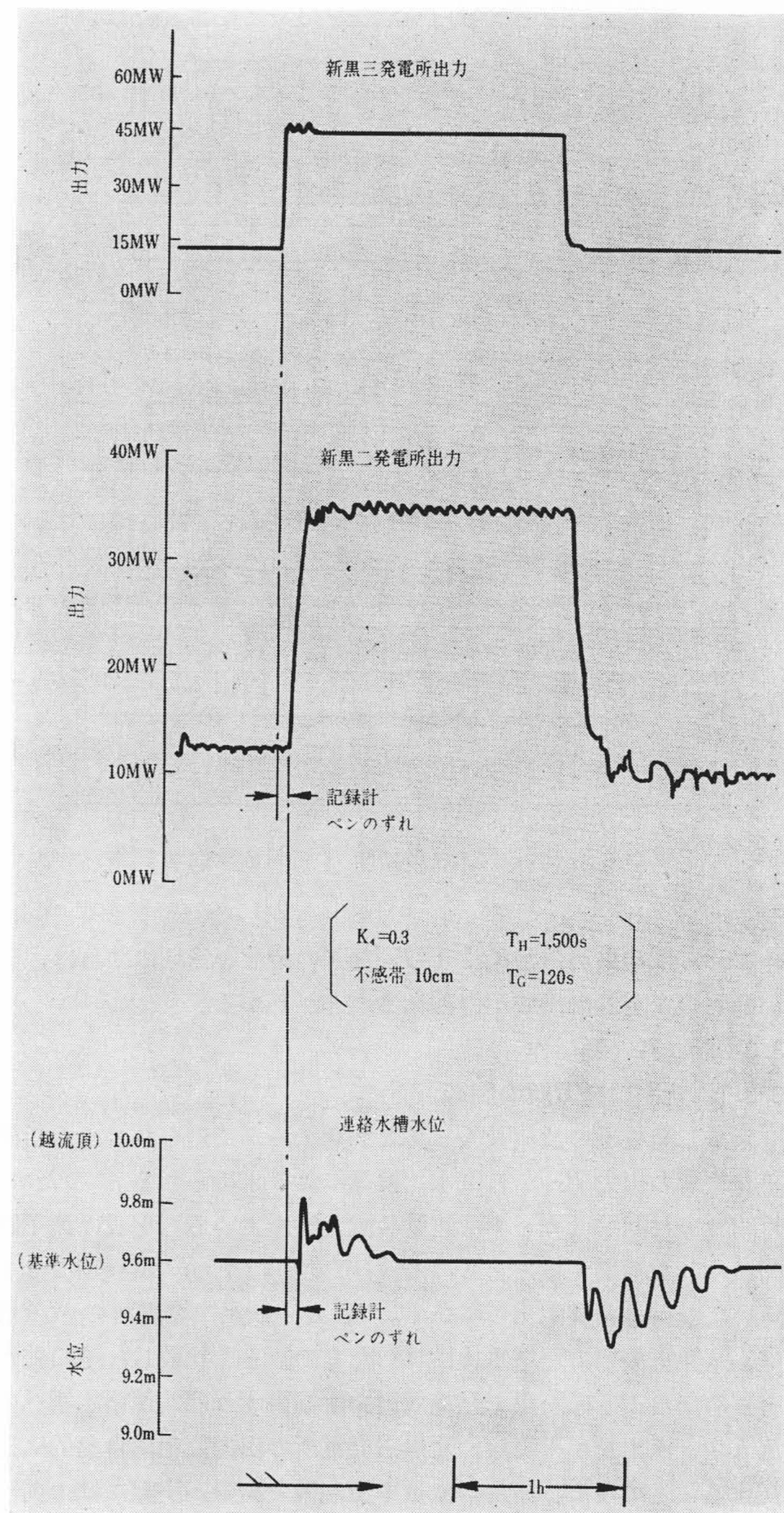


図9 新黒二発電所水位制御現地試験結果

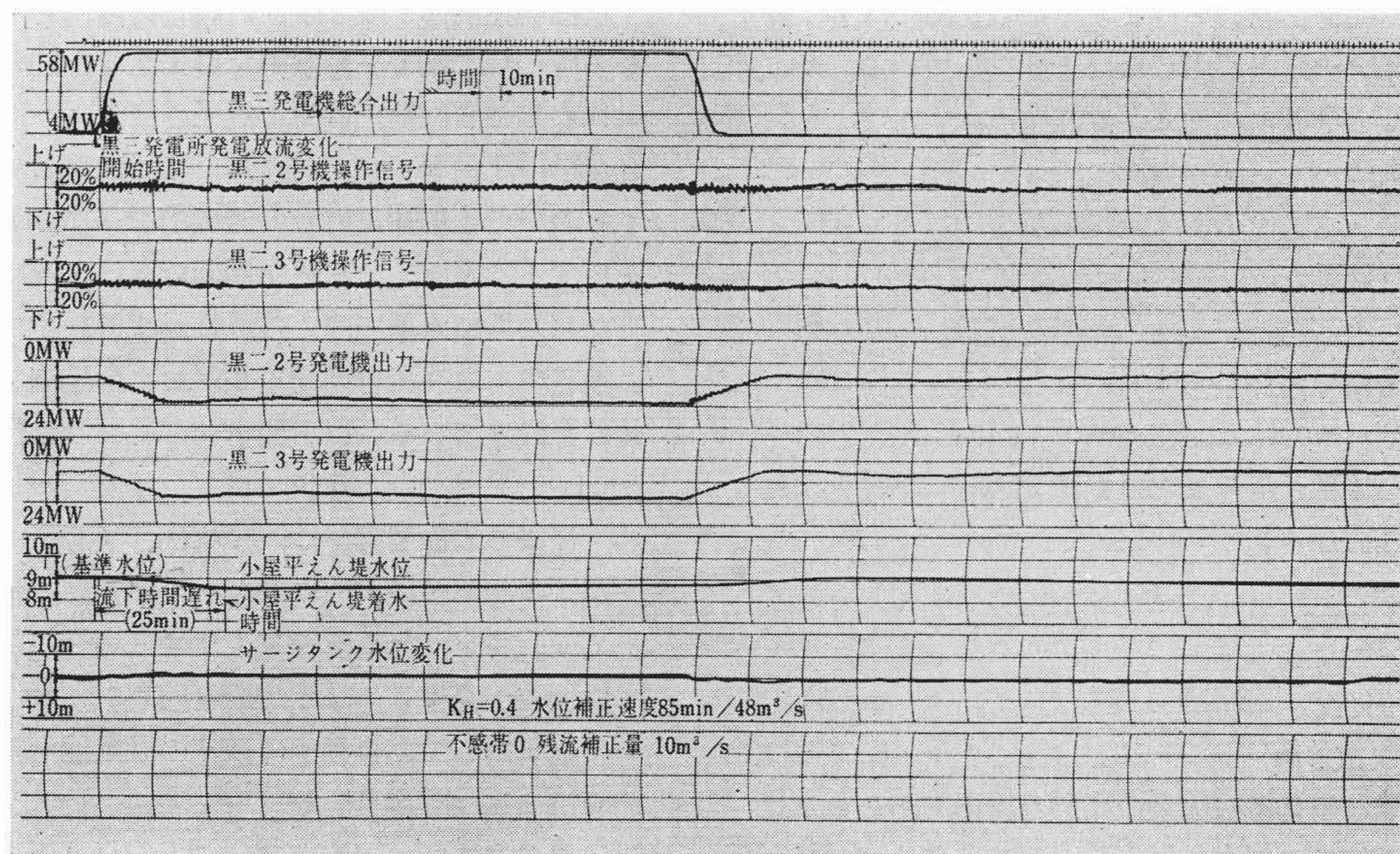


図10 黒二発電所水位制御現地試験結果

制御系の動特性および安定性は、アナコン解析結果(3.2.2参照)と
きわめてよく一致している。

表2は現地試験の結果整定された諸定数を示したものである。

5. 結 言

水力発電所の自動化、無人化が各電力会社において計画されているが、黒部水系のように、小容量の調整池をもった発電所が直列にある場合は、上流発電所の出力変化に追従して、下流発電所の出力を自動調整する水位制御装置は、水系の円滑な運用に大きな効果がある。すなわち

- (1) 上流の黒三、新黒三発電所の自動水位制御装置と協調運転することにより、急速な立上りをもつピーク時(約500 MW)の運転が安定で、しかも有効に行なうことができるようになった。
- (2) 自動化によって、運転員の負担が著しく軽減された。

表2 諸 定 数 整 定 表

	新 黒 二	黒 二
k_H	0.3	0.4
T_H	0.3	30
T_G	100	—
T_{GF}	—	100
T_{GL}	—	60
H_S	9.6	9.6
J_H	10 cm	0

本装置の運転実績は、水系制御の自動化に対し、技術的な成果を示すものであり、今後における、水系一貫運用の面でも大いに役だつものと考えられる。わが国に数多い、このような水系の自動運用計画に多少とも参考になれば幸いである。

製作にあたり、終始、ご指導をいただいた、関西電力株式会社の関係各位に厚くお礼申し上げます。



特 許 の 紹 介



特許第486048号(特公昭41-10580号)

中山 敬 造

継 電 器 誤 動 作 防 止 方 法

保護継電器のうち、系統電圧に比例した電圧を電圧変成器を介して入力の一つとして導入し、動作する原理のものにおいては、電圧変成器自体の故障、変成器の関連回路の障害のために、系統に故障がないにもかかわらず、リレー入力が異常となり誤動作する。これを防止するために、リレーに印加される電圧ともう一つ別の電圧変成器の回路の電圧とを比較し、両者に差があるときに動作する電圧平衡リレーを設け、これが動作したときには保護リレーの動作を阻止することが一般に行なわれている。しかし、このため、その間は系統に事故が生じて保護リレーが動作すべきときも動作せず、送電線は無保護の状態となつてはなほだしく危険である。

この発明はこの点を解決するために電圧平衡リレーが動作して保護リレー回路をロックした場合には、保護リレーに印加する電圧を健全な電圧回路に自動的に切り換えるとともに、保護回路のロックを解いて、短時間の間に保護リレーを動作可能の状態にすることができる方式を提供しようとするものである。図1、図2は実施例の

接続図である。a, b, c および a', b', c' は実質的に同一母線、1, 1' はそれぞれの母線電圧を導出する電圧変成器、2 は 1, 1' の出力に差があるとき動作する電圧平衡リレー、2a, 2b はその常開、常閉接点、3 は保護リレーである。1, 1' の出力は 2a, 2b を介したのちで同名相のものが並列に接続される。常時 1, 1' とともに正常であるから 2 は動作せず 2b が閉となり、3 は 1 の電圧により正しい判断をする。このとき 3 が動作すれば図2 2b', 3a がともに閉成するから引きはずし回路が完成され、保護が行なわれる。いま、1 に障害が発生したとすると 2 は動作し、3 の動作はいったんロックされる。一方 2 の動作で 2a' が閉成されるから 3b が閉成されていることと相まって補助リレー 4 が動作する。したがって 2b' は 4a' により側路されるから(図2), 3a が閉成されれば引きはずし回路を生かすことができる。同時に 2a が閉、2b が開となることによって 3 に対する電圧入力は 1 から 1' に切り換えられ、3 は 1' の正しい電圧に応動することになり、かくして所期の目的を達成することができる。(福島)

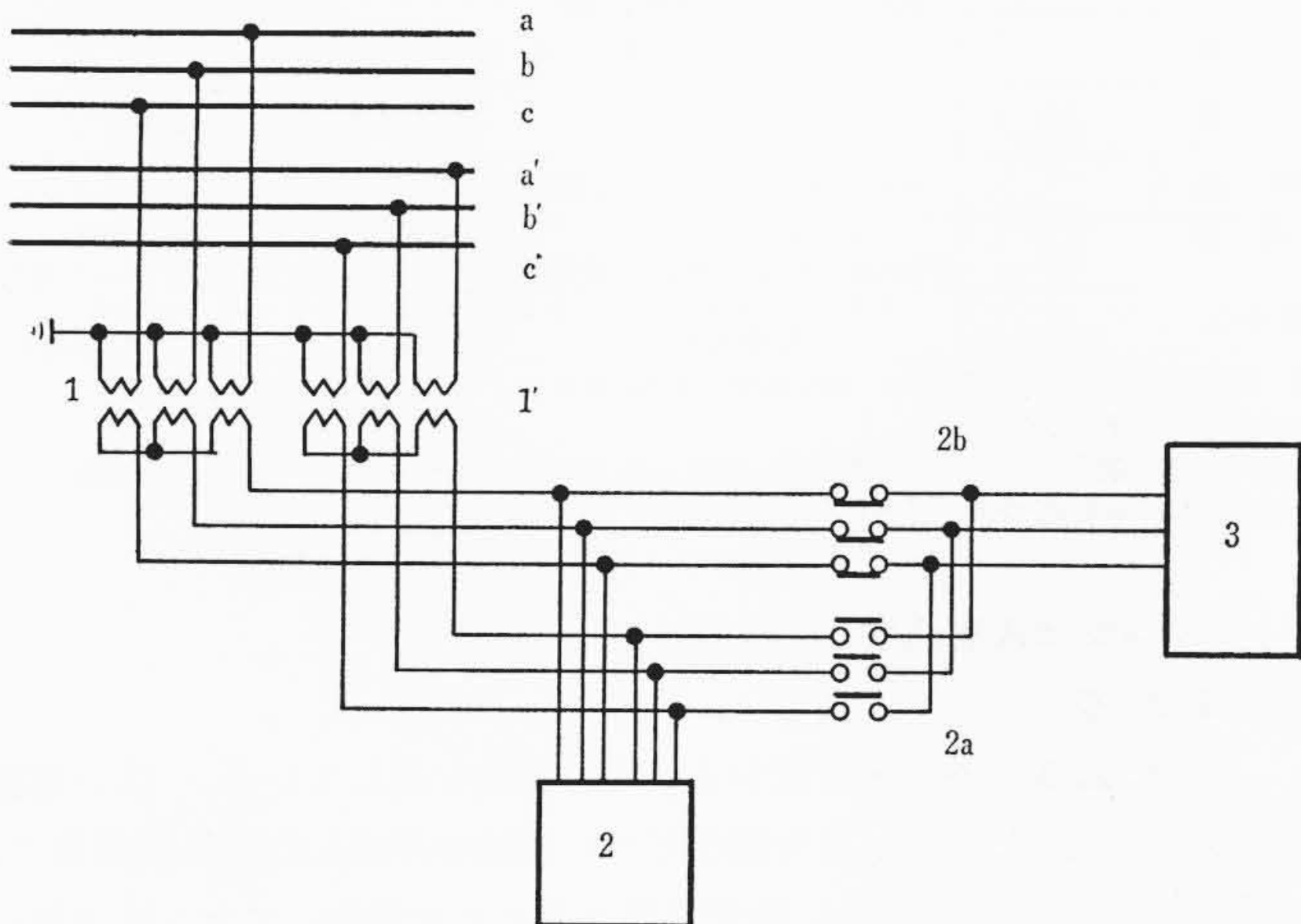


図 1

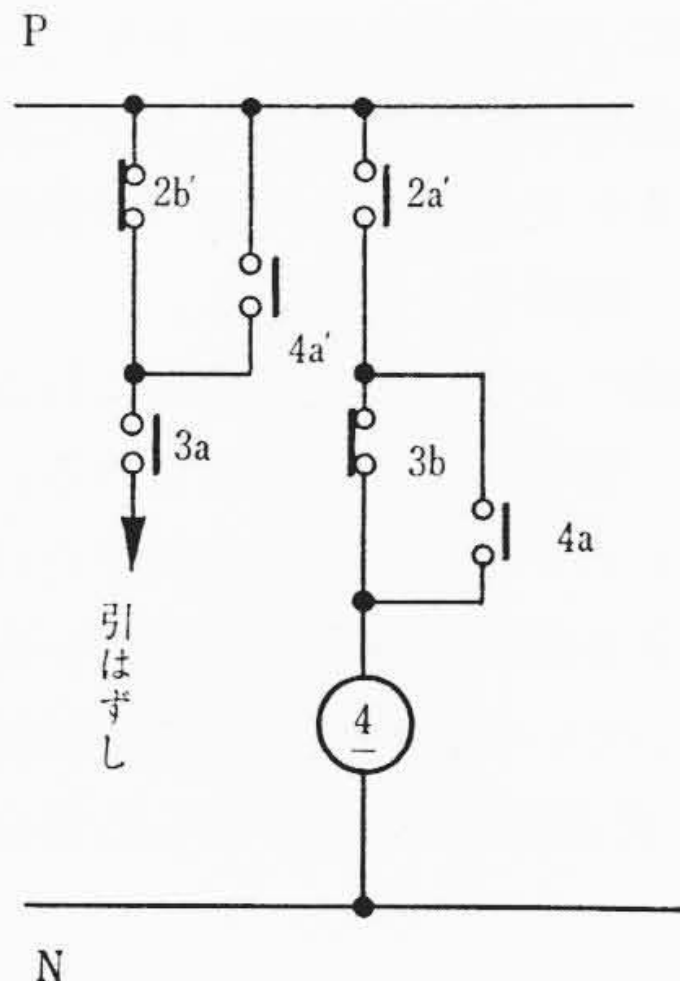


図 2