

マイクロ水力発電システムの スモール・コンピュータ制御に関する研究*

清水幸丸*¹, 島地岩根*², 佐野達哉*³
二木善希*³, 森本幸作*³, 葛原定郎*¹

Studies of a Microcomputer Control Method for a Microhydropower System

Yukimaru SIMIZU, Iwane SIMAJI, Tatsuya SANO,
Yoshiki FUTAKI, Kousaku MORIMOTO and Sadao KUZUHARA

This paper describes a control method for a microhydropower system using a microcomputer. This method is different from that of large-scale hydropower plants. The theory and experimental results of this two year investigation are included in this report.

Key Words: Fluid Machinery, Microhydro Electric Power, Microcomputer Control, Cross-Flow Turbine, Telephone Control, Remote Control

1. 緒 言

わが国の理論包蔵水力の内、水力発電に利用されている割合はわずかに13%と報告されている⁽¹⁾。また約7%は開発予定とされているが、残りの80%は開発の対象にすらなっていない。この理由は取得電力量が少なく、経済性が低いためである。このような極小水力を経済性のある電力として使用するためには、従来の大形水力と同一の方法を用いたのでは無理がある。この問題点を乗り越えるために、著者らは、極小発電電力を集積して利用可能な発電量にする方法を研究してきた⁽²⁾。この研究は、マイクロ水車、発電機システム、および運転制御方法等多岐にわたっている。マイクロ水車発電では、出力が小さいので、人件費等の関係から無人運転が必要である。しかも、なるべく、設備費のかからない、簡略で精度のよい制御が必要になる。

本報では、著者らが開発したスモール・コンピュータ制御について述べる。この方法は従来の大形水力発電所の水車制御とは異なるいくつかの利点を持ってい

る。さらに、豊富な実験結果で有用性が実証された。

2. 水車発電システムの概要

本研究は、標高500mの三重大学演習林内溪流に3台のマイクロ水車(1, 2および3号機)を設置し、長期間(1号機設置以来6年間)にわたって行われている。図1にはクロスフロー水車(1号機)の配置図を示す。取水口から水車設置場所までの導水管距離が410m、静止落差は26mである。導水管は10インチのポリエチレン管を使用している。図2に2, 3号機のポンプ反転形水車の配置図を示す。ポンプ反転形水車は演習林庁舎前にある池を上部水槽代わりに使用した。静止落差27mで、池から水車までの導水管は8イン

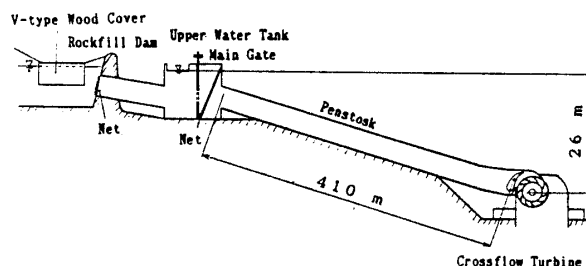


図1 クロスフロー水車の配置図

* 平成元年4月4日 第66期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和63年10月11日。

*¹ 三重大学工学部(〒514 津市上浜町)。

*² 三重大学生物資源学部。

*³ 三重大学大学院。

チの塩化ビニール管を使用した。最下流部では4インチ鋼管で2分割し、2台を並列運転する方法を採用した。図3に本発電システムを示す。1号機は10kW同期発電機SG, 2, 3号機は2kW誘導発電機IG₁, IG₂から構成される。

また、本発電システムはASR(自動速度調整器), AVR(自動電圧調整器)を備えているので回転数1200rpm, 出力電圧220Vに保つことができ、周波数60Hzの良質の安定した電力を得ることができる。

3. クロスフロー水車のコンピュータ制御

図4に本発電システムに使用したクロスフロー水車を示す。この水車は、そのとき溪流を流れる水力エネルギーを可能な限り電力エネルギーに変換するという考えに基づき制御される。この制御を最大出力運転制御と呼ぶ。以下、その方法を説明する。

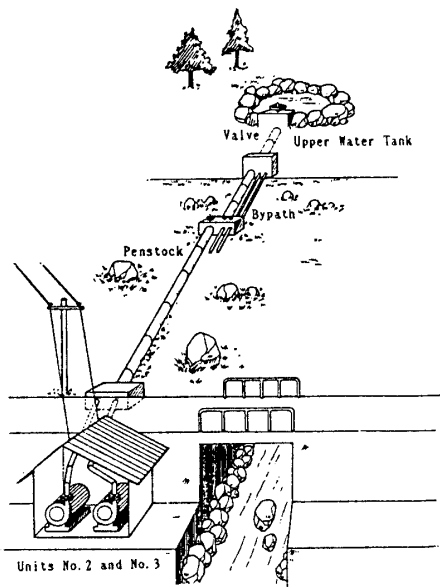


図2 ポンプ反転形水車の配置図

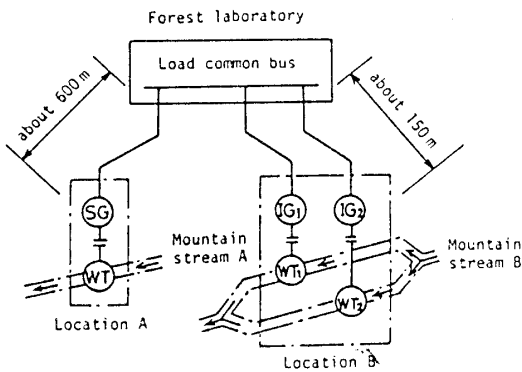


図3 水車発電機の地理的配置と共通負荷母線

最大出力運転状態は、図5に示すように取水口の上部水槽でわずかにオーバフローしている状態、すなわち溪流の水がすべて導水管に入り込み、かつ、導水管内に水面が発生していない状態である。このときの全水頭は本システムの総落差 H_0 (26m) で、有効水頭 h_e は全水頭から管路内損失を引いたものである。

$$h_e = H_0 - \lambda \frac{H_0}{d \cdot \sin \theta} \cdot \frac{v^2}{2g} \dots \dots \dots (1)$$

本システムでは $\lambda = 0.012$, $\sin \theta = 410/26$, $d = 0.254$ (m), λ はレイノルズ数の関数として与えることもできるが、運転範囲内ではあまり影響がないので一定とした。この時の水車入力 W は

$$W = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h_e \dots \dots \dots (2)$$

この状態から、降雨などにより溪流の水量が増加した場合、ガイドベーンを操作しないならば、増加分は、導水管に取り入れられずにオーバフローし、管内の流量は変わらない。したがって、水車入力 W も変化しない。そこで増加した水量に対応するガイドベーンを開き、増加分を管内に取り入れたならば、総落差は H_0 のままで管内の流量は Q から Q_1 に増加する。この時、管摩擦損失は流量の増加の二乗に比例して増大するため有効水頭は減少するが、この水車の運転範囲内では、

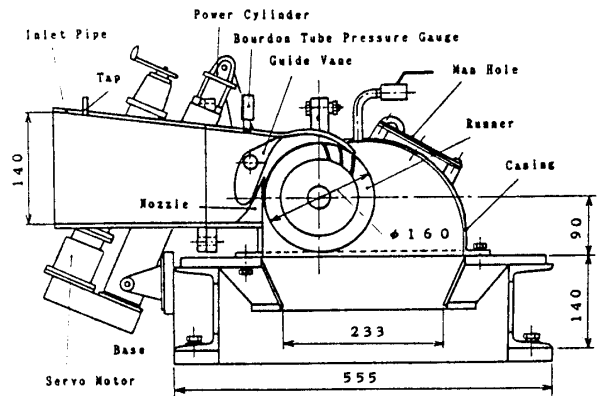


図4 クロスフロー水車(1号機)

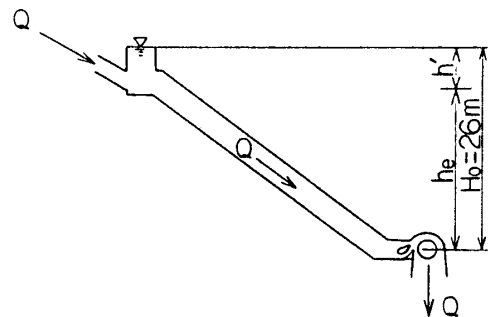


図5 最大出力運転状態

その減少分よりも流量 Q の増加による入力増加の方が大きいので水車入力は増大する。すなわち、管内流量が Q_1 に増加したことにより水車入力は、

$$W_1 = \rho \cdot g \cdot Q_1 \cdot h_e \quad \dots\dots\dots (3)$$

に増大する。また、渓流の流量が最大出力運転状態の Q から Q_2 に減少した場合、ガイドベーンを操作を行わないならば、導水管に流れ込む流量と水車から吐き出される流量の釣合いがくずれ、導水管内に水面が発生し、両者が釣合うまで水面は低下していく。低下後の全水頭を h_t 、ガイドベーンの出口面積(ノズル面積)を $G_v \times a_n$ で表す(G_v : ガイドベーン開度, a_n : 最大ノズル面積)。ノズル係数を C_n とすると

$$Q_2 = C_n \cdot G_v \cdot a_n \cdot \sqrt{2g \cdot h_{e2}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

本システムでは $a_n = 0.31 \times 0.03 \text{ m}^2$, $C_n = 0.85$ である。ここで h_{e2} は有効水頭であり、全水頭 h_t から管摩擦損失を差し引いたものであるので、

$$h_{e2} = h_t - \lambda \frac{h_t}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (5)$$

この時の水車入力は

$$W_2 = \rho \cdot g \cdot Q_2 \cdot h_{e2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

となり、流量の減少とともに落差までが減少するため、水車入力の減少は大きなものとなる。そこで、ガイドベーンを閉じることにより水位が導水管入口でオーバーフロー状態で平衡を保つようにすれば流量 Q_2 はそのまま、全水頭は h_t から H_0 に増大する。その時の有効水頭を h'_{e2} とすると水車入力は、

$$W_2 = \rho \cdot g \cdot Q_2 \cdot h'_{e2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

まで回復させることができる。

以上が最大出力運転制御の概要である。制御の入力情報として、簡単に測定できる水車入口圧力 P と出力電流 I を採用し、この P と I の二つの情報だけで最大出力運転制御を行う方法を考える。

まず、本システムにおける有効水頭 h_e 、入口圧力 P 、流量 Q 、流速 v 、水車回転数 N 、軸トルク M 、出力電圧 E 、電流 I の関係を次式に示す。

$$h_e = \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\rho \cdot g \cdot Q \cdot h_e \cdot \eta_h = N \cdot M \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$N \cdot M \cdot \eta_m = \sqrt{3} E \cdot I \cdot \cos \phi \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 η_h は水車効率、 η_m は発電機効率を示す。

式(8)~(10)から

$$\rho \cdot g \cdot Q \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \right) \eta_h \cdot \eta_m = \sqrt{3} E \cdot I \cdot \cos \phi \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで $v^2/2g \ll P/\rho g$ より

$$Q = \frac{\sqrt{3} \cdot E \cdot I \cdot \cos \phi}{P \cdot \eta_h \cdot \eta_m} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 η_h は比回転数速度 $N \cdot d_r / \sqrt{h_e} [\text{rpm} \cdot \text{m}^{1/2}]$ の関数として表す。ここで d_r は羽根車直径で $d_r = 0.16(\text{m})$ である。その水車効率曲線の近似式の係数を a, b, c とし、次式に示す。

$$\eta_h = a \left(\frac{N \cdot d_r}{\sqrt{h_e}} \right)^2 + b \left(\frac{N \cdot d_r}{\sqrt{h_e}} \right) + c \quad \dots\dots\dots (13)$$

回転数 N は ASR により一定であり、また $h_e = P/\rho g$ であるので式(13)は、

$$\eta_h = A/P + B/\sqrt{P} + C \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$A = a(N \cdot d_r)^2 \cdot \rho g, \quad B = b(N \cdot d_r) \cdot \sqrt{\rho g}, \quad C = c$$

よって、入力情報 P から η_h が求まる。ここで、係数 a, b, c は実験により求めた値を採用し、

$$a = -1.25 \times 10^{-3}, \quad b = 0.105, \quad c = -1.505$$

また、 η_m は 0.6 付近で安定しているので、 $\eta_m = 0.6$ と仮定した。力率 $\cos \phi = 0.75$, $E = 220 \text{ V}$ であり、以上の値を式(12)に代入することにより、出力電流 I と入口圧力 P から流量 Q が求められる。この関係を I, P を軸にプロットすると図6の流量一定の線になる。

次に式(4)、(12)、(14)より G_v, P, I の関係を導くと

$$G_v = \frac{\sqrt{3} \rho E I \cos \phi}{\sqrt{2 a_n C_n \eta_m (A \sqrt{P} + B P + C P \sqrt{P})}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

この関係を、同図中にプロットするとガイドベーン開度一定の線を得る。また図中のオーバーフローラインは式(5)において $h_t = H_0 (= 26 \text{ m})$ とし、式(4)と式(12)の関係をもとにプロットしたものである。

出力電流 I と入口圧力 P をサンプリングし、この

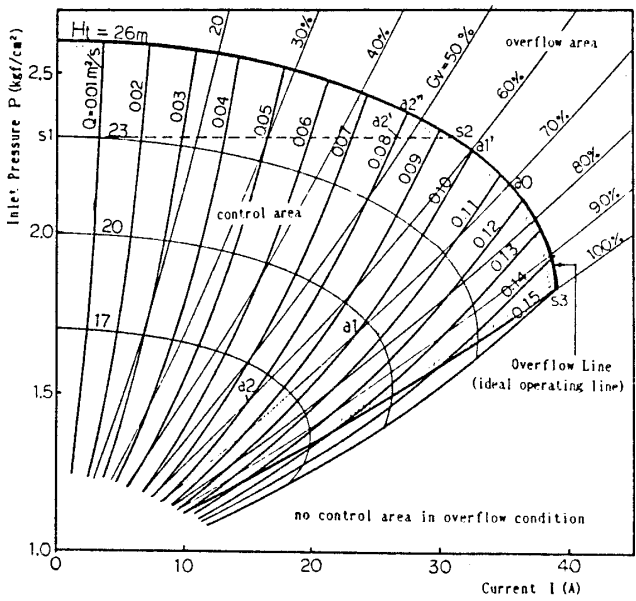


図6 入力情報を軸にとった本システムの運転状態図

図に当てはめてみれば現在の運転状態を把握することができる。最大出力運転制御が正常に作動していれば運転状態は常に Overflow Line 付近にある。例えば、平衡状態 a_0 からガイドベーン固定のままで流量が減少し、平衡状態が a_1 に移動したとする。ここから最大出力運転制御を行うためには次のようにすればよい。入口圧力 P と発電電流 I をサンプリングし、現在の運転状態を判断し流量を読む。この流量での最大出力運転は a_1' になる。また、その時の圧力を P_m とする。

全水頭を総落差 $H_0=26$ m とした時の入口圧力が最適入口圧力 P_m であるので、

$$H_0 = \frac{P_m}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \left(1 + \lambda \frac{H_0}{d \cdot \sin \theta} \right) \dots\dots\dots (16)$$

よって

$$P_m = \rho g \left\{ H_0 - \frac{v^2}{2g} \left(1 + \lambda \frac{H_0}{d \cdot \sin \theta} \right) \right\} \dots\dots\dots (17)$$

本システムでは $\lambda=0.012$, $\sin \theta=410/26$, $d=0.254$ (m), $H_0=26$ (m)。制御プログラム中では式(12)より求められる Q より v を算出し、それを式(17)に代入することにより最大出力運転状態入口圧力 P_m を得る。そして現在の圧力 P と比較し、その差が小さくなる方向へガイドベーンを操作する。圧力 P が $P_m=P$ となった時が最大出力運転制御状態である。

次に a_0 点から溪流の水量が増加した場合、運転状態はそのまま増加分はオーバーフローする。このとき P, I に変化は見られぬためコンピュータには水量増加の情報は入らない。そこで最大出力運転状態で平衡を保っている時には I, P に変化が見られるまで少しずつガイドベーンを開いていくようにする。ガイドベーンを開きすぎて $P < P_m$ になれば再び $P = P_m$ になるようにガイドベーン閉の指示を出す。

実際の運転では、上記のように a_1 点から a_2 点へと急激に溪流の流量が変化することはなく、少しずつガ

イドベーンを開閉するので、常に Overflow Line 付近で運転されることになる。

また、最大出力運転制御では流量が少なくなるにつれて管摩擦損失が減るために有効水頭が増し管内圧力は上昇していく。本システムでは導水管に 10 インチのポリエチレン管を使用している。入口圧力 P がパイプラインの許容最大内圧 ($P=2.3$ kgf/cm²) を上回る場合は、許容最大内圧を超えぬよう管路保護をしなければならない。そこで、流量減少時にも許容最大内圧を超えないように制御した。最大出力運転制御に管路保護を加えた場合の運転曲線は図中、 $S_1-S_2-S_3$ である。例えば運転状態が図中 a_1' 点から溪流の水量低下により a_2 に移った場合、最大出力を得るには a_2'' 点までガイドベーンを閉める必要があるが管路保護のため a_2' 点 ($P=2.3$ kgf/cm²) でストップし運転することになる。

4. ポンプ反転形水車の制御

演習林の 2, 3 号機水車はポンプ反転形水車(以後、フランス水車と呼ぶ)であるが、これは渦巻ポンプのケーシングをそのまま使用しているために、ガイド

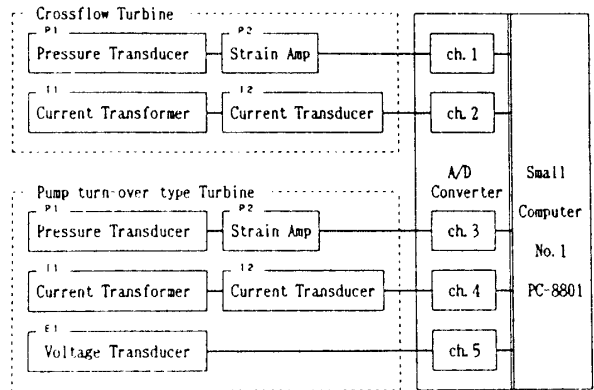


図 8 水車のコンピュータ制御入力関係

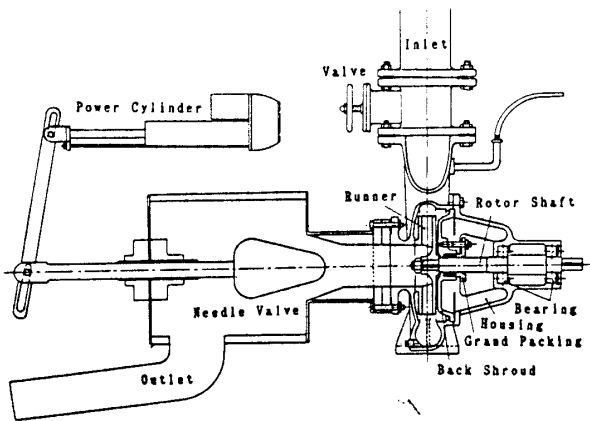


図 7 ポンプ反転形水車

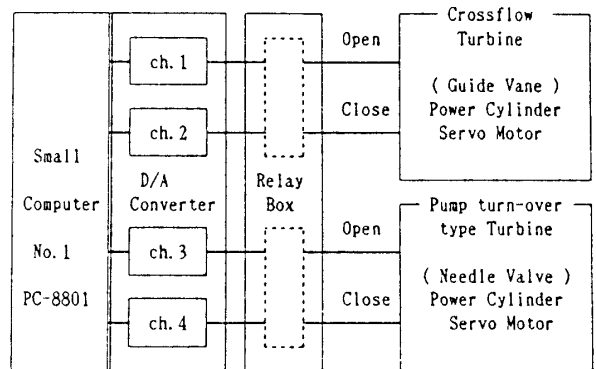


図 9 水車のコンピュータ制御出力関係

ベーン等の流量調節装置は付いていない。そこで、図7に示すように水車出口に簡単なニードルバルブを取付け、これをパワーシリンダにより開閉し、制御を行った。

5. 制御の入出力システム

本システムでは、溪流の流量に合わせて、水車のガイドベーン、あるいは、ニードルバルブを制御するわけであるが、実際の流量の変化は数時間～数日というオーダであり、それほど、高速で制御する必要はない。よって、その制御には安価なパーソナルコンピュータでも十分である。

まず、パーソナルコンピュータへの入力システムを図8で説明する。水車制御のためのパーソナルコンピュータへの入力データは、クロスフロー水車が入口圧力(P_e)、出力電流(I_e)で、フランシス水車が入口圧力(P_f)、出力電流(I_f)、電圧(E_f)である。入口圧力(P_e , P_f)は圧力変換器(P_i)により、その圧力に相当するひずみができる。動ひずみ計(P_2)により、そのひずみ量に相当する電圧(DC $_{max}$ 5V)を出力する。

出力電流(I_e , I_f)は、制御盤内に接続したCT(I_1)、トランスデューサ(I_2)で、その電流を直流電圧(DC $_{max}$ 5V)に変換する。出力電圧(E_f)も、トランスデューサ(E_1)により、その電圧をDC $_{max}$ 5Vにまで下げる。これらのDC $_{max}$ 5Vに変換した各値をA/D変換し、パーソナルコンピュータ(No.1)へ入力し、データの処理を行う。

次にパーソナルコンピュータからの出力システムを図9で説明する。

パーソナルコンピュータ(No.1)に入力して計算処理を行ったデータに対して、水車の制御を行う。クロスフロー水車の場合は、水車入口に設けられたガイドベーン、フランシス水車の場合は、水車出口に設けられたニードルバルブをそれぞれパワーシリンダのサーボモータを駆動することにより開閉を行い、流量の調節を行う。

開の場合は、ch.1(ch.3)をON、ch.2(ch.4)をOFFとし、D/A変換をして、ch.1(ch.3)からDC5V、ch.2(ch.4)から0Vを出力する。リレーボックスのリレー回路のOpen側が作動する。パワーシリンダがガイドベーン(ニードルバルブ)を開ける方向に駆動される。

閉の場合は、ch.1(ch.3)をOFF、ch.2(ch.4)をONとし、D/A変換をして、ch.1(ch.3)から0V、ch.2(ch.4)からDC5Vを出力する。リレー回路のClose側が作動する。パワーシリンダがガイドベーン(ニード

ルバルブ)を閉める方向に駆動される。

6. パーソナルコンピュータ通信による遠隔管理

本システムではパーソナルコンピュータ通信により、これら水車の遠隔管理を行っている。図10にパーソナルコンピュータによる通信システムを示す。これにより、フロッピーディスクに記録してある水車の運転状態のデータを毎日、大学の研究室まで転送することにした。

また、このパーソナルコンピュータ通信により水車の制御プログラムの修正およびガイドベーン、ニードルバルブの操作を大学側から直接行うことができる。

7. コンピュータ制御システム

多重マイクロタービン発電システムのコンピュータ制御システムを図11に示す。

①パーソナルコンピュータ、②モデム、③A/Dコンバータ、④D/Aコンバータ、⑤リレーボックス、⑥制御盤、⑦クロスフロー水車、⑧10kW同期発電機、

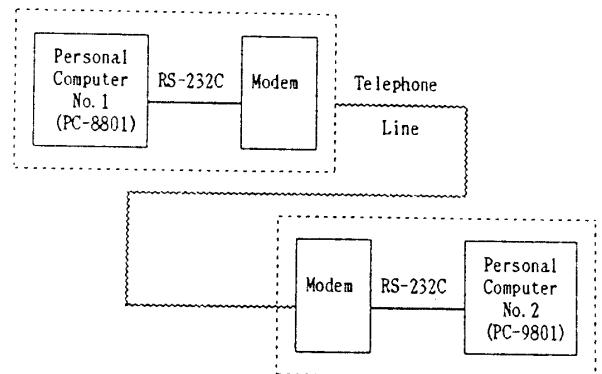


図10 パーソナルコンピュータによる通信システム

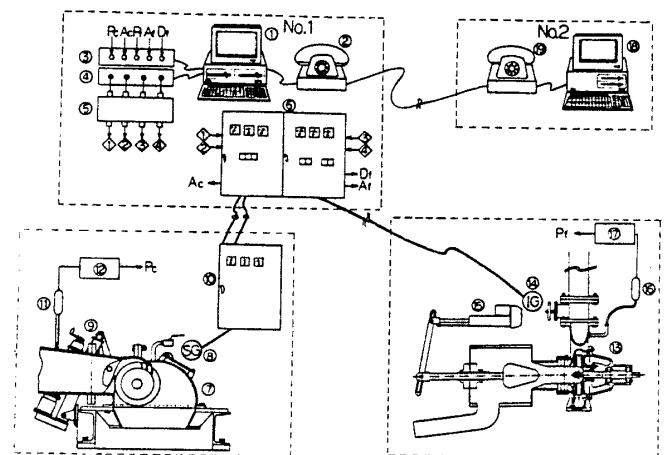


図11 コンピュータ制御システム

⑨パワーシリンダ, ⑩制御盤, ⑪圧力変換器, ⑫動ひずみ計, ⑬ポンプ反転形水車, ⑭2 kW 誘導発電機, ⑮パワーシリンダ, ⑯圧力変換器, ⑰動ひずみ計, ⑱パーソナルコンピュータ, ⑲モデム.

8. 制御プログラム

以上のようなシステムで水車の制御を行う. その制御プログラムのフローチャートを図 12, 13 に示す.

(a) メイン・プログラム(図 12)

制御におけるメインループは図中③-⑤-⑧-⑩-⑫-③である. 以下それぞれ簡単に説明する.

③ パソコン通信を行う時間になったら通信用サブルーチンを実行する. その後各水車の制御を行い(①②)メインループにもどる.

⑤ 一定間隔で入力データの記録を行うためのタイマーで時間になるとサンプリングを行い(⑥)データを保存する(⑦).

⑧, ⑩はクロスフローおよびフランシス水車制御用タイマーで時間になるとそれぞれのサブルーチンを実行する.

⑫ S. TIME, C. TIME, F. TIME の各値を時間とともに減らす.

(b) クロスフロー水車制御用サブルーチン(図

13)

まず入口圧力と電流のサンプリングを行い(①), 流量 Q を計算する(②). 各値をチェックし(③④), 異常がある場合, 再びサンプリングを行い, 再度異常値を示した場合はトラブル発生と判断してその処理を行う(⑦⑧). ③において異常がない場合は通常の制御を行う. 流量 Q が一定値より多い時には最大出力運転制御を行うために最適入口圧力 P_{cm} を算出する(⑩). 流量 Q が少ない場合には管路保護制御を行うために $P_{cm} = 1.9$ とする(⑪). 次に P_{cm} と現在の入口圧力との比較を行い, ガイドベーンの判別をし(⑫), ⑭でそれぞれの操作を行う. その操作量に応じて次のガイドベーン操作までのインターバルの量を決定しメインループにもどる(⑮).

(c) フランシス水車制御用サブルーチン(図 14)

①で入口圧力, 電流, 電圧のサンプリングを行った後, クロスフロー水車と同様にトラブルのチェックを行う(②-⑦). ⑧で現在の電流に対して最適の入口圧力 P_{fm} を決定し, P_{fm} と現在の入口圧力との比較を行い, バルブ操作の判別をする(⑨). ⑩でバルブの操作を行った後, 次のバルブ操作までのインターバル(F. TIME)を決定して(⑫), メインループにもどる.

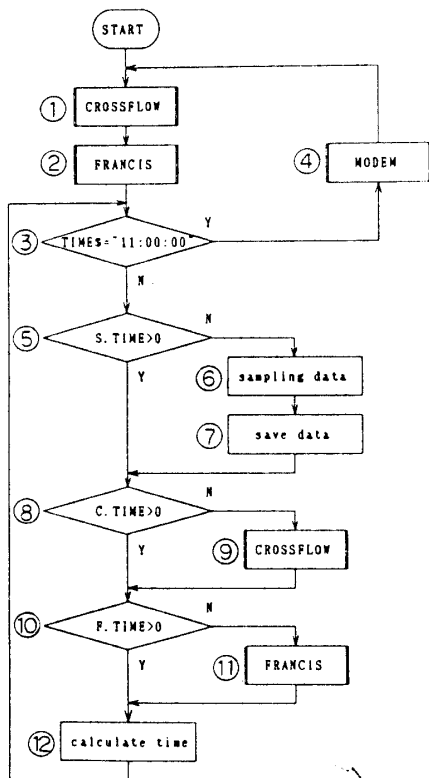


図 12 フローチャート(メインプログラム)

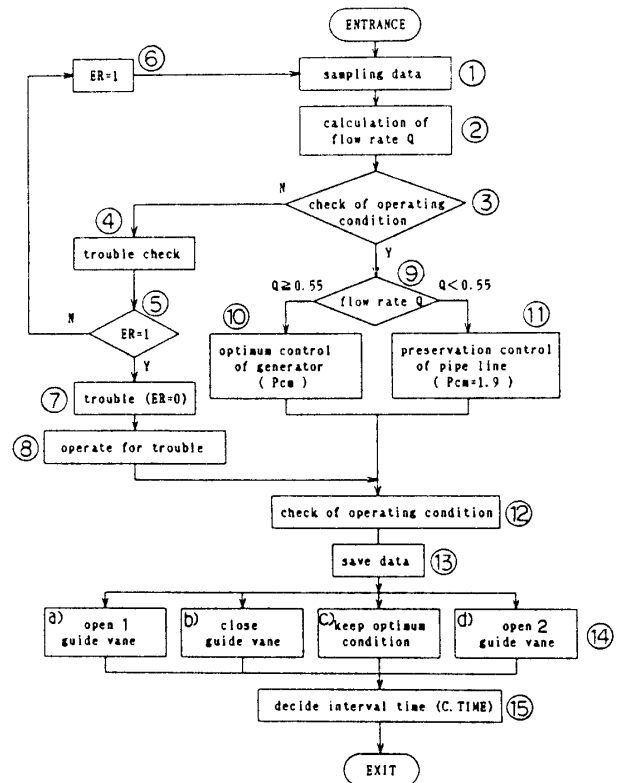


図 13 フローチャート(サブルーチン“CROSSFLOW”)

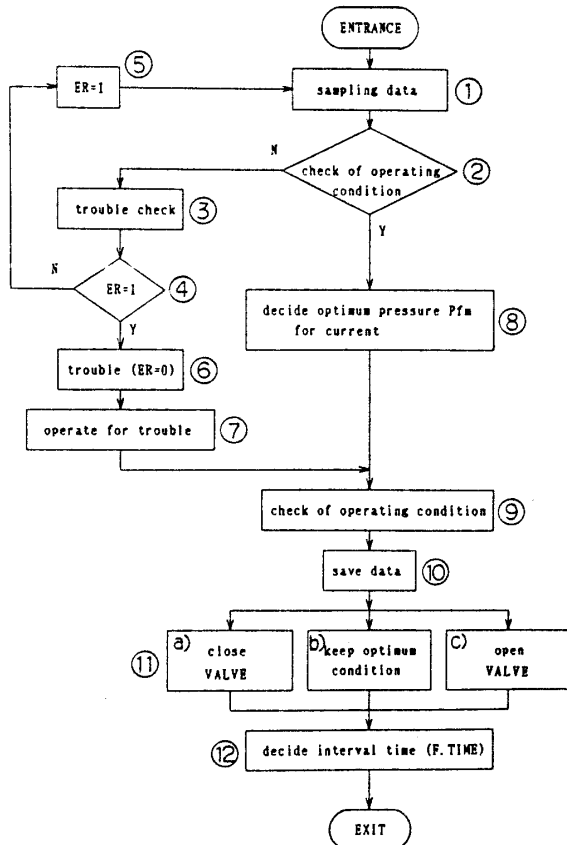


図 14 フローチャート(サブルーチン“FRANCIS”)

9. 実証発電実験の結果

図 15 に 1987 年 10 月, 11 月のコンピュータ制御を行った場合の連続運転の結果を示す。コンピュータ制御を行うことにより, 日による発電量の変動は小さくなり, 11 月 3 日~5 日までの落葉の堆積による発電量の減少以外は, 毎日ほぼ安定した電力を得ている。また, 溪流の流量の減少に伴う発電量の減少も以前のように急激な減少ではなく, 緩やかな減少となっている。この方法でコンピュータ制御はうまく行われているとみてよい。

10. 結 論

(1) スモールコンピュータ(パーソナルコンピュータ)を用いた簡単なコンピュータコントロールを採

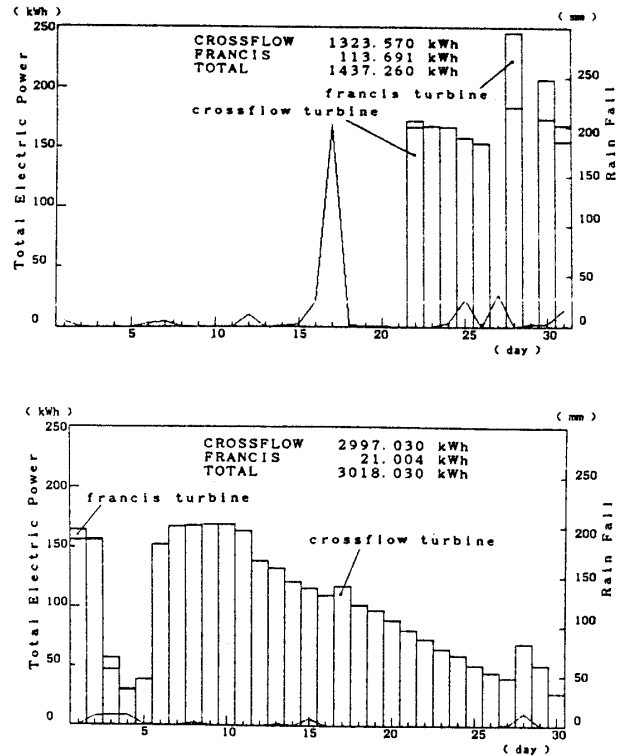


図 15 1987 年 10 月, 11 月の発電量と雨量

用することによって, この種発電は無人数化でき, 管理が容易であることが明らかになった。なお, ここで行われているコンピュータコントロール方法は, 従来, 大型水力発電所で採用されている方法と相当異なる独自開発のものである。

(2) パーソナルコンピュータ通信により本水車発電システムの遠隔管理が可能となった。

本研究は, 文部省科研エネルギー特別研究の助成を受けた。多大のご指導を受けたエネルギー特研代表, 故水科篤郎京都大学名誉教授, またご協力いただいた阿部勲三重大学農学部教授, 演習林職員一同に謝意を表す。

文 献

- (1) 資源エネルギー庁, 第 5 次発電水力調査資料, (1984)。
- (2) 清水・ほか 4 名, 第 25 回動力・エネルギーシンポジウム論文集, No. 870-10(1987), 1.