

新インバータ発電システムによるマイクロ水力発電システム の高性能化に関する研究*

(可変落差・可変流量下での高性能発電)

清水 幸丸^{*1}, 前田 太佳夫^{*1}, 藤原 秀成^{*2}
高田 実^{*3}, 大塚 史郎^{*4}

Studies on High Performance Generation System of Micro-hydraulic Turbine in Low Flow Rate and Low Head

Yukimaru SHIMIZU, Takao MAEDA, Hidenari FUJIWARA,
Minoru TAKADA and Shiro OHTSUKA

Improvement of the generation power in micro-hydraulic turbines is shown in the range of low flow rate and low head using a new inverter generation system. The generation power can be obtained down to very low flow rate and head using the new inverter generation system with variable rotational speed control, where a water turbine cannot produce the electric power in a normal constant-speed-control system. Experiments were carried out using a practical micro-hydraulic turbine with 2 kW output and variable rotational speed in a forest on the mountain, Mie University. The total efficiency is kept at a high value even in the very low partial load area. Compared with the constant speed control, the generation power is improved over 20 percent by varying the rotational speed.

Key Words: Fluid Machinery, Water Turbine, Low Flow Rate, Low Head, New Inverter Generation System, Variable Rotational Speed Control

1. 緒 言

発電量が 100 kW 以下の水力発電は、マイクロ水力発電と呼ばれる。マイクロ水力発電は、大規模なダムを必要としないため、環境に及ぼす影響が極めて小さい。マイクロ水力発電を活用することにより、電力網の負荷調整として重要な位置を占める現在の水力発電をより有効なものにするだけでなく、現在利用されていない定格出力を得られない低流量・低落差の莫大な包蔵水力を活用することができる。しかし、マイクロ水車の発電量は、河川の水量・落差に大きく左右され⁽¹⁾、従来の大規模発電システムのような定速発電方式では対応できない。そのため、流量や落差の変化に容易に対応できる可変速発電システムを適用する必要がある。

このような可変速発電システムの研究例としては、VVVF インバータ発電システムを潮力発電に応用した塩野ら⁽²⁾の研究例がある。著者らは、インバータ可

変速発電システムをマイクロ水力や風力に適用する研究を行っている⁽³⁾。

本研究では、このシステムを落差および流量電動の大きい、溪流用マイクロ水力発電に適用し、その有効性について、実験的に研究した。その結果、インバータ可変速発電システムは、定格出力が得られないような低流量・低落差領域においても高い発電性能を示すことが実証された。

2. 記 号

- A : 水車羽根車出口断面積 0.0055 m²
 D : 水車口径 0.08 m
 E : 水車に流入するエネルギー ρgQH
 f_c : 制御周波数(電源周波数, 発電機励磁周波数) Hz
 f : 発電機回転周波数 Hz
 H : 水車ヘッド(有効落差) m
 (水車入口と出口の水頭差, 速度水頭差は入口および出口の断面積が等しいので零になる)
 N : 水車回転数 rpm
 N_r : 定格回転数 1215 rpm
 P : 発電量 W

* 原稿受付 1995年4月17日。

^{*1} 正員, 三重大学工学部 (〒514 津市上浜町 1515)。

^{*2} 三重大学大学院。

^{*3} 学生員, 三重大学大学院。

^{*4} 電源開発(株) (〒104 東京都中央区銀座 6-15-1)。

- P_r : 定格出力 2 000 W
- Q : 流量 m^3/s
- s : すべり [式(1)]
- T : 水車トルク $N \cdot m$
- u : 水車羽根車外周での回転速度 m/s
- η : 水車効率 [式(2)]
- η_g : 発電機効率 [式(5)]
- η_r : 総合効率 [式(6)]
- ν : 軸動力係数 [式(3)]
- ω : 水車回転角速度 rad/s
- ϕ : 有効落差係数 [式(4)]
- ρ : 水の密度 kg/m^3

3. 新インバータ発電システムの概要

3・1 新インバータ発電システム の概念 図1は水車回転数に対する出力の概念図である。従来の定速運転では定格回転数 N_r のみでしか発電できない。したがって、定格流量 Q_r のときには出力 P_r が得られるが、 Q_1 のような低流量域では発電量は著しく低下し P_1 となる。さらに低流量の Q_0 になると発電不能となる。しかし、各流量の最高出力が得られる水車回転数で発電運転を行うことが可能ならば、低流量域においても多くの発電量が得られる。つまり、図1において流量 Q_1 のときに回転数 N_1 で運転すれば出力 P_1 が得られ、また、定速運転では発電不能であった流量 Q_0 においても回転数 N_0 では発電量 P_0 が得られる。

図2は発電機の運転システムの概要を示す。極対数 p (本発電機では $p=3$) の発電機を回転数 N で運転するときに、発電機から出力される電力の周波数 f は $f = Np/60$ となる。本文中では、この発電機出力の周波数 f を発電機回転周波数とする。電源周波数 f_c を発電機回転周波数 f よりも小さくすると、その速度差 $(f - f_c)$ に対応したトルクが発生し、発電を行う。電源周波数 f_c が発電機回転周波数 f よりも高い場合には、発電機はモータとして働き、電源から発電機に電力が供給されなくてはならない。

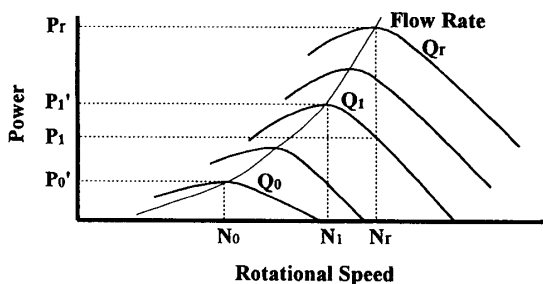


Fig.1 Power characteristics of a water turbine as a function of the rotational speed

図3は新インバータ発電システムの原理を示す。本システムは入力エネルギーの変動が著しい場合に有効と推察される。システムの詳細については文献(3)を参照願うことにして、ここではその概略を述べる。水車回転数を回転計で検知し、図2に示した電源周波数 f_c をインバータを用いて、水車回転数によって決まる発電機回転周波数 f より小さく設定することにより、任意の水車回転数で発電可能である。また、本システムでは水車回転数と電源周波数の差を、操作することによって、発電量の調整が可能である。本研究では、この水車回転数によって決まる発電機回転周波数 f と電源周波数(制御周波数、発電機励磁周波数) f_c の差をすべり s と定義し、次式で表す。

$$s = (f_c - f) / f \dots\dots\dots (1)$$

一般には、すべり s が負の方向に大きいほど負荷が大きくなり、発電量が多くなる。しかし、水車の能力を超えるほどの負荷を設定すると、水車回転数が低下し、発電量が低下する。したがって、水車の能力と平衡した最適すべり s による運転条件が存在する。しかし、水車回転数に対するすべり s の関係は、発電機特性、水車特性および各構成機器の慣性モーメントの影響を受け、リアルタイムで制御することは極めて困難である。したがって、本研究では、水車回転数によって決まる発電機回転周波数 f が変化しても、式(1)のすべり s が一定となるように電源周波数 f_c を設定した。本文中では、この制御を定すべり可変速制御と表す。すべり s は負荷が小さい順に -1% 、 -1.5% 、 -2% 、 -2.5% 、 -3% の5種類について実験を行い、最適な

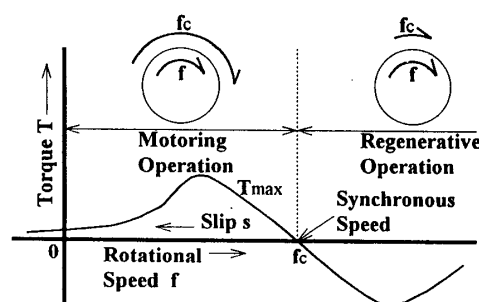


Fig.2 Schematic illustration of the torque characteristics of an induction generator

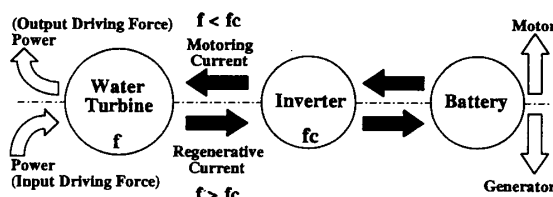


Fig.3 Schematic diagram of the inverter system

運転条件の決定を行った。

また、本システムによる可変速制御の有効性を示すために、従来の誘導発電機を用いた定速発電運転と比較を行った。この定速発電運転は、電源周波数 f_c を商用電源と同じ 60 Hz に固定して行った。この状態を本文中では 60 Hz 定速制御と表す。

3.2 インバータ周辺装置 図4には制御信号系および電力系の概略を示す。発電時には水車回転数に対応した制御周波数を、パーソナルコンピュータから自作の電流制御型PWMインバータ装置に転送し、パワートランジスタを操作する。本PWMインバータ装置から出力される制御信号は、0.5 Hz きざみである。

発電された交流電力は、トランジスタで直流電力に変換され、バッテリーに充電される。バッテリーは12Vのものを17個直列に接続し、定格で204Vである。電力を消費する場合、実用上は、バッテリーからインバータを介して、系統電力網に接続すればよいが、本実験はバッテリー中心の独立閉鎖系システムで行われたので、

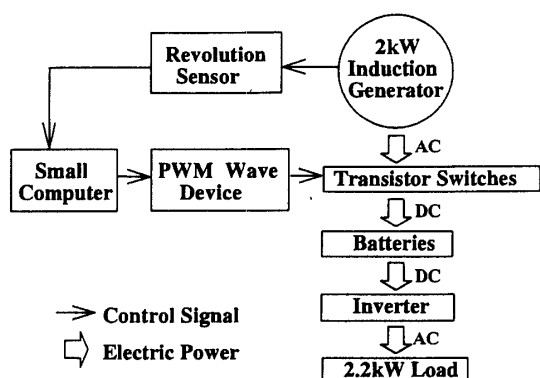


Fig. 4 Flow chart of electric power and control signal

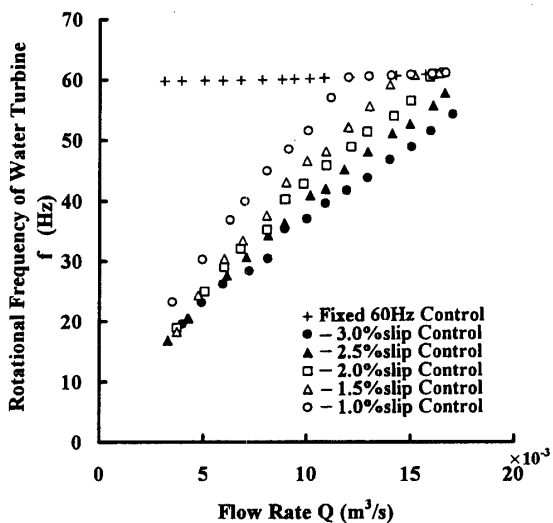


Fig. 5 Rotational frequency of the water turbine against flow rate

バッテリーが過充電になったときは、実験に用いたPWMインバータ装置を用いて直流を交流に変換し、負荷の2.2 kW ヒータで放電を行った。

3.3 流量と周波数の関係 図5には、流量 Q と発電機回転周波数(水車回転数によって変化) f の関係を示す。本研究で用いたPWMインバータ装置の制御周波数 f_c は、発電機定格周波数の60 Hzを超える回転数域では一定値 $f_c=60$ Hzとなる。そのため、負荷の小さい1%定すべり可変速制御では、流量 $Q > 12 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ の範囲で発電機回転周波数が $f > 60$ Hzとなり、 Q の増加に伴い式(1)のすべり s が増加し、定すべり可変速制御ではなくなる。 -1.5% 定すべり可変速制御の場合も同様に $Q > 15 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ の範囲で定すべり可変速制御が行えなくなる。この発電機回転周波数が60 Hzを超える領域では、発電機のトルク特性のみによって回転数が定まるので、制御方法によらずすべり s が等しくなり、その結果として発電量も等しくなる。しかし、負荷の大きな -2% 以上の定すべり可変速制御では、最大流量 $17 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ に達するまでに発電機回転周波数が60 Hzを超えることはないため、全流量域で一定のすべりが保たれる。

4. 実験装置および実験方法

4.1 実験装置概要 実験は三重大学演習林に設置されている実物マイクロ水力発電装置⁽⁴⁾を用いている。装置の概要を図6に示す。人工池を上部水槽として使い、水は上流側流量調節バルブとサージタンクを経て導水管に流れ込む。サージタンクは、水面の揺れを抑え、水位を一定にするために設けてある。導水管には高圧塩化ビニル管を使用し、全長約100mで管内径0.2mである。導水管は水車上流約10mで内径0.1mの管に接続された水車に導かれる。水車から放出された水は、格子で整流され流速測定用のノズルと下流側流量調節バルブを経て川に流出する。池の

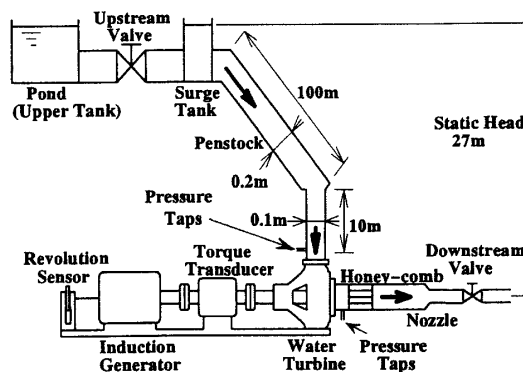


Fig. 6 Experimental apparatus

水面から水車までの最大静止落差は 27 m あるが、水車下流に設置した流量測定用ノズルの流動損失により、落差の損失が大きく最大有効落差は約 15 m になる。このときの最大流量は $17 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ である。このため、1200 W 以上の出力が得られなかった。したがって、出力 1200 W 以上を発電させる場合は、ノズルを外した状態で発電実験を行った。

本研究では、ポンプ反転形水車を用いた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。しかし、羽根車には、遠心ポンプ羽根車ではなく、水車用に改良した羽根車を用いた。図面の詳細は文献(6)を参照されたい。

4.2 水車周辺の測定装置 水車ヘッド(有効落差)の測定は、水車上流 $2D$ と下流 $2D$ に設けた壁面圧力検出孔から得られる圧力をそれぞれ差圧変換器に導き、出力信号をパーソナルコンピュータに取り込んだ。流速測定は、水車出口下流に整流装置を設け、その下流 $17D$ に縮流比 2.28 : 1 のノズルを設置して行った。水車、トルク計、定格 2 kW の発電機および回転

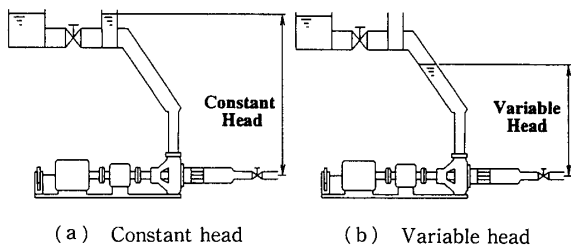


Fig. 7 Schematic illustration of static head

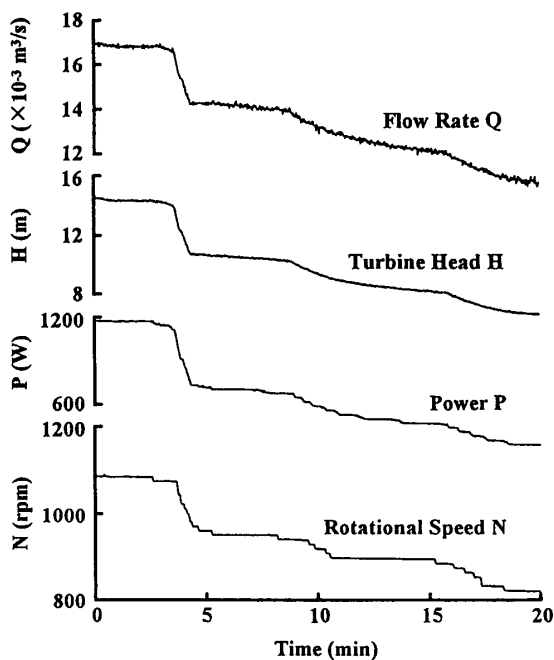


Fig. 8 Time charts of measured data

計は同一軸に設置してある。

4.3 実験方法 上流側流量調節バルブによって水車への流入量を調整し、また、下流側流量調整バルブを操作して流出量を調整した。上流側の流入量と下流側の流出量をそれぞれ独立して操作することにより、流量および導水管内の水面高さを変化させた。図 7 (a) は落差一定の実験の様子を模式的に示したものであり、図 7 (b) は落差を変化させた実験を示している。

実験中は、水車回転数、有効落差、流量、トルク、直流電圧、直流電流、交流電圧、交流電流および交流発電量を測定した。サンプリング周波数 70 Hz で測定した瞬時データは、パーソナルコンピュータに入力され、100 個ごとに順次平均した。測定結果の一例を図 8 に示す。本報告で述べる可変落差・可変流量発電システムは一見非定常に見えるが、電氣的現象からみれば、極めてゆっくりとした変化である。したがって、得られたデータは新インバータ発電システムの静特性を十分に表していると言える。本報告では、流量および有効落差の 10 個平均値(約 15 秒間)を順次とり、直前の平均値との差が 1% 未満である平均値のみを選択し、考察した。

5. 実験結果

5.1 回転数と出力の関係 図 9 には、無次元水車回転数 N/N_r と無次元出力 P/P_r の関係を示す。 N_r 、 P_r は定格出力時の回転数および出力を表す。

同じ回転数 N/N_r では、すべりが大きいほど負荷が大きくなるため、出力 P/P_r も大きくなっている。また、すべりが小さいほど負荷が小さいため、-1% およ

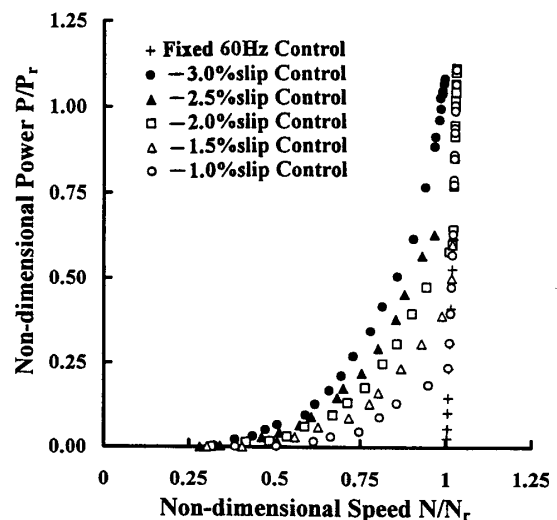


Fig. 9 Measured non-dimensional power as a function of non-dimensional speed

び-2%定すべり可変速制御では定格出力以下ですでに定格回転数 $N/N_r=1$ に達するが、定格回転数に達する直前の出力は小さい。その理由は、3・3節で述べたように、水車回転数がPWMインバータ装置の最高設定周波数60Hzを超える領域では、流量・落差の増加に応じてすべりが増加するため、定格回転数に達した直後には急激に発電量が上昇するためである。それとは反対に、負荷の大きな-3%定すべり可変速制御では定格出力 $P/P_r=1$ を得ても定格回転数に達しない。一方、従来の発電方式である60Hz定速制御では、定格回転数 $N/N_r=1$ でしか発電できないことがわかる。

5・2 流量と発電量の関係 図10は、流量に対する水車発電量を示す。実線は、図7(a)に示した静止落差27m一定のもとで、-3%定すべり可変速制御を行った場合の水車出力を示す。図7(a)は、従来の水車の運転方法に相当する。これに対し、●印は、図7(b)のように落差を変化させ、かつ、-3%定すべり可変速制御を行った結果を示す。図から落差一定の場合と、落差を変化させた場合とでは出力は一致することがわかる。したがって、以下では落差を変化させて行った実験結果を中心に述べることにする。また、図10において、従来の60Hz定速制御(+印)では $8 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 以下の流量域では発電量は負になっている。この負の領域では、発電機はモータとして働いており、電源側から水車に電力を供給していることを表し、従来の誘導発電システムでは発電不能の領域である。したがって、図中斜線で示した領域分だけ、可変速制御によって発電量が増加する。

5・3 流量と有効落差の関係 図11には静止落差

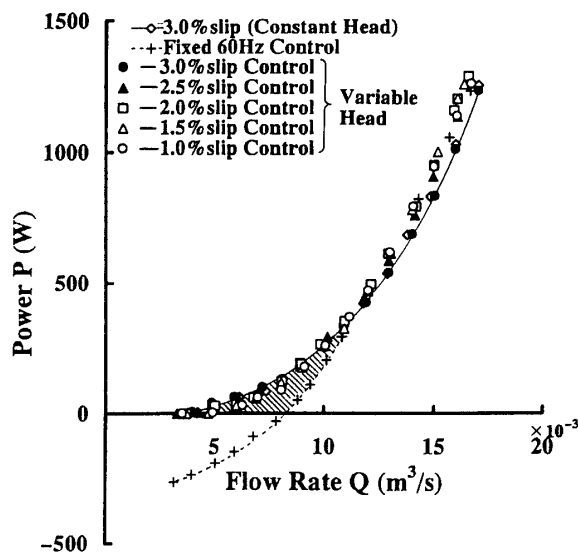


Fig. 10 Measured power at various flow rates

を変化させた場合の、流量 Q と水車ヘッド(有効落差) H の関係を示す。可変速制御運転では、 Q と H の関係は、ほぼ同一の傾向を示す。また、すべりが大きいほど、負荷が大きいため、水のエネルギーは水車に無理なく与えられ、有効落差の低下量は大きくなる傾向を示す。一方、+印の60Hz定速制御では低流量域において、特殊な傾向を示すが、これは、図10で述べた

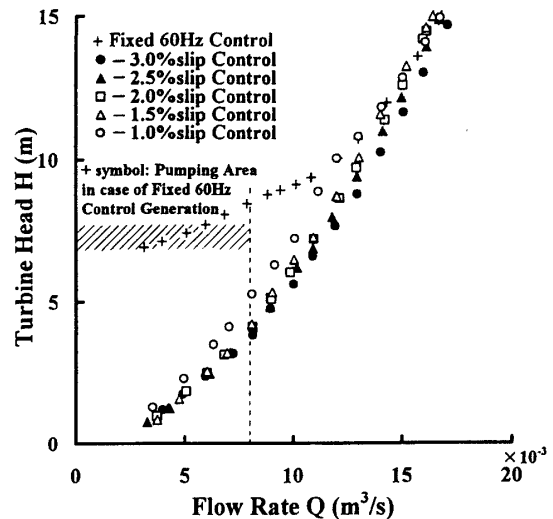


Fig. 11 Measured turbine head at various flow rates

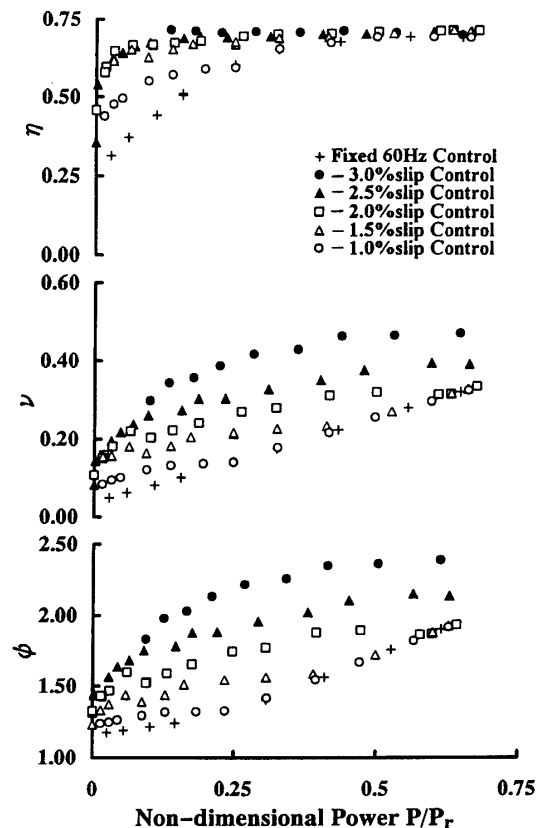


Fig. 12 Characteristics of the water turbine used in the system

ように、本実験方法の関係上、ポンプ運転が起こった結果である。通常の発電運転においては、図の斜線領域では発電をしなくなる。

5.4 可変速制御運転による水車特性 図12には、可変速制御および従来の定速制御で水力発電を行った場合の水車特性を示す。上段に水車効率 η 、中段に軸出力係数 ν 、下段に有効落差係数 ϕ とおのおの無次元出力 P/P_r との関係を示す。 η 、 ν および ϕ は次式で定義する。

$$\eta = T\omega / \rho g Q H \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\nu = T\omega / (0.5 \rho A u^3) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\phi = H / (0.5 u^2 / g) \quad \dots\dots\dots (4)$$

本研究では簡便なポンプ反転型水車を用いたため、水車自体の性能はあまり良くない。可変速制御を行った場合、水車効率 η の最高効率値はすべりによらず約71%である。また、すべりが大きくなるにしたがい、低出力域において η は高い値を維持している。したがって、すべりが大きいと、低出力域、すなわち、部分負荷運転域で水車効率は高くなる。60 Hz 定速制御では、 $P/P_r \geq 0.25$ においては-1%定すべり可変速制御とほぼ同程度の効率を示すが、 $P/P_r < 0.25$ の低出力域では可変速制御よりも著しく低下する。

軸出力係数 ν および有効落差係数 ϕ も、効率 η と同様の傾向を示し、可変速制御ではすべりが大きい程 ν および ϕ は高い値をとり、60 Hz 定速制御では $P/P_r < 0.25$ において可変速制御よりも ν および ϕ は著しく低下する。また、60 Hz 定速制御において ν および ϕ の値が小さいということは、式(3)および式(4)より、水車が高回転域のみで有効であることを示す。

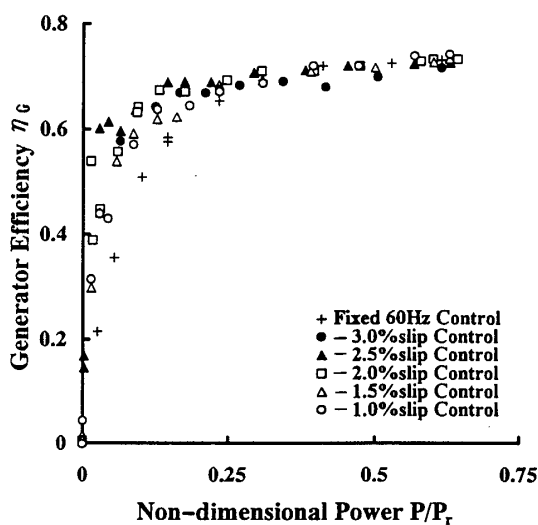


Fig. 13 Generator efficiency

5.5 発電機効率 図13には、発電機効率 η_g と無次元出力 P/P_r との関係を示す。 η_g は発電機電気系のみ効率を表し、発電量 P と水車軸トルク T を用いて次式で定義する。

$$\eta_g = P / T\omega \quad \dots\dots\dots (5)$$

可変速制御においては、 $P/P_r \geq 0.15$ の範囲で η_g はほぼ一定の効率約70%を保つ。一方、60 Hz 定速制御においては、 $P/P_r < 0.30$ の範囲で η_g は著しく低下している。したがって、新インバータ発電システムを用いて可変速制御することにより、極めて出力の小さい部分負荷運転領域を含む全出力域において、発電機を効率よく運転することができる。

5.6 総合効率 図14には、新インバータ発電システムの総合効率 η_T と無次元出力 P/P_r の関係を示す。 η_T は発電量 P と水車に流入するエネルギー $\rho g Q H$ の比を取り、次式で定義する。

$$\eta_T = P / \rho g Q H \quad \dots\dots\dots (6)$$

新インバータ発電システムを用いた可変速制御では、すべりが大きいほど低出力域まで高い効率が保たれ、特に-3%定すべり可変速制御では、 $P/P_r \geq 0.15$ の広い出力範囲において効率50%を維持するが、 $P/P_r > 0.3$ においては、他の定すべり可変速制御よりも η_T は低い。これは、この範囲では、-3%定滑り可変速制御は、発電機効率 η_g が他の定すべり制御よりも低いことによる。一方、60 Hz 定速制御では、 $P/P_r \geq 0.25$ においては、発電機回転周波数が60 Hzを超えている-1%定すべり可変速制御と同じ効率が得られている。しかし、 $P/P_r < 0.25$ の低出力域では、3.3節で示したように、-1%可変速制御の発電機回転周波数が60 Hz以下になり定すべり可変速制御が回復し、効率の減少も緩やかになるのに対して、60 Hz 定速制御ではその領域において急激に効率は減少する。したがって、新インバータ発電システムを用いると、部分負荷

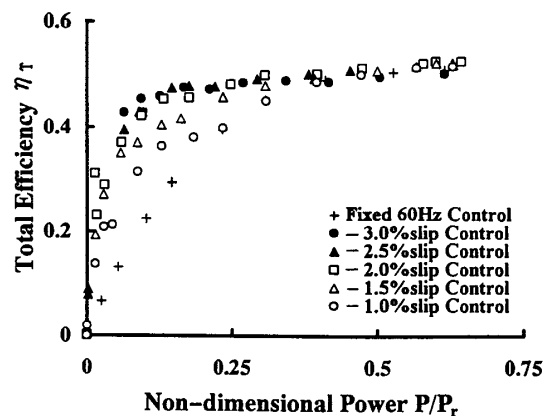


Fig. 14 Total system efficiency

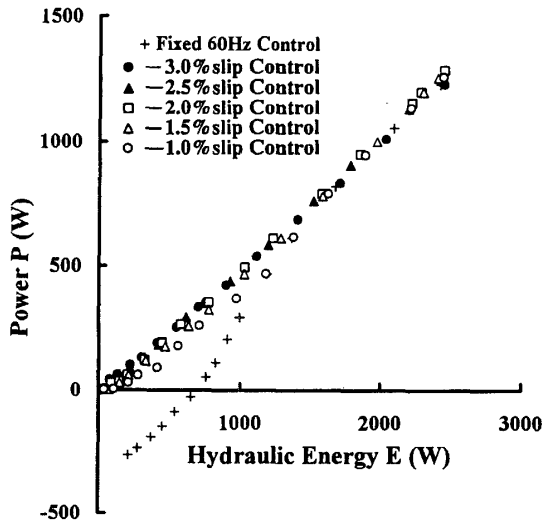


Fig. 15 Generated power as a function of hydraulic energy

運転領域において、総合効率も向上させることがわかる。

5・7 可変速発電による発電量の増大 新インバータ発電システムによる定すべり可変速制御を用いた場合の発電量と、従来の60 Hz定速制御の場合を比較し、その増加量を検討する。図15には水車に流入する水のエネルギー $E = \rho g Q H$ と発電量 P の関係を示す。可変速制御および60 Hz定速制御による曲線 $P_V(E)$ および $P_F(E)$ について、それぞれ最小二乗法を用いて近似式を求める。次に述べる式(7)および式(8)を用いて、定すべり可変速制御では $0 \leq E \leq 2400$ の区間で積分し、60 Hz定速制御では発電量が正となる $655 \leq E \leq 2400$ の区間で積分し、水車に流入する水のエネルギー変化に対する総発電量を求め、比較する。

$$\overline{P}_V = \int_0^{2400} P_V(E) dE \dots \dots \dots (7)$$

$$\overline{P}_F = \int_{655}^{2400} P_F(E) dE \dots \dots \dots (8)$$

積分結果の \overline{P}_V および \overline{P}_F は、河川の流量および落差が変化する確率分布が一様であると仮定した場合の、水車発電量の総和に相当する。

図16には、積分結果から得られた可変速制御と定速制御発電量の比 $\overline{P}_V / \overline{P}_F$ を示す。5種類の定すべり可変速制御全てにおいて60 Hz定速制御の総発電量を上回り、-2%および-2.5%定すべり可変速制御時に最高で22%の総発電量の増加があり、-3%定すべりでは19%、-1.5%定すべりでは18%、-1%定すべりでは11%増加する。この理由は、高発電領域で高い総合効率を示す-2%および-2.5%定すべり可変速制御の方が、-3%定すべり可変速制御の場合よりも、全発電

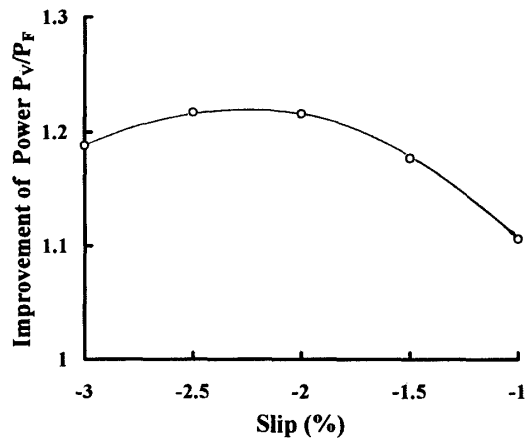


Fig. 16 Improvement in generated power at various slip rates

領域にわたって積分すると、著しく発電量が向上するためである。この結果より、本システムにおいては最も高い発電量が得られる-2%および-2.5%定すべり可変速制御が最適であるといえる。

6. 結 言

新インバータ発電システムを用いて、定格2 kWマイクロ水力発電システムの定格以下の低流量・低落差域の発電特性を実験的に研究し、以下の結論を得た。

- (1) 従来発電が不可能であった極めて低流量・低落差の条件においても、可変速制御を用いると発電が可能となった。
- (2) 定すべり可変速制御を用いれば、部分負荷運転領域においても総合効率を高く維持できる。
- (3) 水車に流入する変動の大きいエネルギーに対する総発電量は、-2%および-2.5%定すべり可変速制御のときに最高値をとり、従来の60 Hz定速制御と比較して、総発電量が22%も向上する結果を得た。

最後に、助言頂いた三重大学電気電子工学科堀孝正教授、石田宗秋助教授、大学院生山田直樹君、実験装置の製作に御尽力を頂いた本研究室鎌田泰成助手、堀場映二技官および卒研生安井義人君に謝意を表す。

文 献

- (1) Shimizu, Y., ほか4名, *Proc. ASME 4th Int. Symp. on Hydro Power Fluid Machinery*, FED-Vol. 43(1986), 117.
- (2) 塩野・ほか3名, 電気学会新・省エネルギー資料, ESC-88-8(1988).
- (3) Shimizu, Y., ほか3名, *Proc. 1st Int. Conf. NESC*, (1993), 557.
- (4) 清水, マイクロ水力ハンドブック, (1989), 136, パワー社.
- (5) 清水・ほか5名, 機論, 55-515, B(1989), 1963.
- (6) 清水, マイクロ水力ハンドブック, (1989), 37, パワー社.