論 文
36～7～7

마이크로 컴퓨터를 이용한 소수력발전소 PID 조속기에 관한 연구

A Study on the Microcomputer-based PID Governor for Small Hydro Power Plant

申 東 烈*·李 圭 鉉*·李 元 龍**
(Dong-Ryul Shin · Kyu-Hyun Lee · Won-Yong Lee)

ABSTRACT

Microcomputer-based PID governor which can be provided either stability or rapid response for small hydro power plant at low cost is developed and adapted to the 5 KW model hydro power for the performance test.

The effects of PID gains on stability boundaries of the hydraulic turbine generating system is investigated. For the optimum selection of the PID gains, general equations are derived on the base of the experiments.

This control system has a good performance at the model of hydro power plant. For the prediction of the control system, a mathematical model was developed and the results of the simulation using this model was matched with the experimental results.

1. 서 론

소수력발전소에서 양질의 전력을 얻기 위해서는, 수요측 부하변화나 저수지의 유량변화에 따른 수차 발전기의 회전수 변화를 최소화 하여야 하며, 이를 위해서는 반응이 빠른 조속기가 필요하다.

종래의 수력 발전소에서는 기계유압식인 탄성복원 조속기(temporary droop governor)[1]를 많이 사용하여 왔다. 일종의 P.I. 조속기인 이 조속기는 안정성과 신뢰성이 높은 반면에, 부하변화에 대한 반응이 느린 단점이 있으므로 유량 변화가 심한 소수력 발전시스템에서는 더욱 나쁜 영향을 미친다.[2] 그러므로 최근에는 다음과 같은 이유에서 마이크로 컴퓨터를 사용하여 디지탈 제어방식에 의한 전자식 조속기가 많이 연구되고 있다.[3),11)]

i) 회전수 제어의 안정성을 해치지 않으면서 부하제어 신호에 대한 빠른 응답을 줌,
ii) 민감도, 미소변이에 대한 반응성 향상,
iii) 시스템 상태변수 프로그램이 자유롭고, PI, PID 및 2차 미분제어기 등을 하드웨어 변경없이 구성할수 있는 다양성이 있음,
iv) 발전소 감시제어, 시동정지 등 순차제어까지 단일의 컴퓨터에 의해 수행 가능하므로 경제적임.

마이크로 컴퓨터를 이용한 조속기는 1975년에 최초로 시도되었으나 그 당시의 마이크로 프로세서인 Intel 8008의 용량이 적어서 PI 제어기 이외의 복잡한 전달함수를 처리하는데에 어려움이 있었으며, 그 후 M8080을 이용한 조속기 연구가 있었다.[4]

한편 현재까지 수력발전소의 제어 시스템과 조속기 연구는 대개가 기계식인 탄성복원 조속기를 대상

* 正 會 員 : 韓國動力資源研究所, 대덕연구소 · 工博
** 正 會 員 : 韓國動力資源研究所, 대덕연구소
接受日字 : 1987年 3月 5日
1次修正 : 1987年 6月 15日

으로 안정도 해석[5),6)] 시스템 모델링[7)]등 이었으며, 더우기 실험적인 결과로서 최적의 조속기 성능을 증명한 연구는 찾아보기 힘들다.

Hovey[8)]와 Schleif[9)] 등에 의해 이론적으로 PI 조속기의 최적의 이득값을 도출한 바 있으며, 일종의 PID조속기인 2차 미분 조속기에 대해서도 연구된 바 있다.[10)]

그러나 PID 조속기의 최적의 이득값에 대하여는 연구가 없었으며, 더우기 마이크로 컴퓨터를 이용한 전자식 PID 조속기를 실험한 논문은 없었다.

그러므로 본 논문에서는 마이크로 컴퓨터에 의한 소수력 발전소의 조속기를 개발하는데에 목표를 두고, 마이크로 컴퓨터 조속기를 설계, 구성하고, 이를 실제의 소수력 발전 모델 프란트에 적용하였으며, PI 조속기에 미분항을 추가할 때의 안정성 영역 해석으로 최적의 PID이득값을 구하여, 이 값에 의한 주파수 응답제어 실험결과를 PI조속기와 비교 평가함으로서 본 마이크로 컴퓨터 PID제어기의 우수성을 입증코져 한다.

기호 설명

a_{23}: 수문개도에 대한 토크 편미분값.
D : 발전기 회전자 복원상수
E : 에러 신호
Go, g : 수차 안내깃 개도(%, PU)
gr :중력 가속도
H : 낙차(m)
i : 서보벨브 입력전류(A)
J : 회전자 극관성 모우멘트($Kg-m^2$)
K_d, K_i, K_p: PID 조속기의 미분, 적분, 비례상수
K_s, K_t :서보벨브, 타코메터 게인
l : 수압관 길이(m)
m : 수차 축 토오크 (kg m)
m(k), m(s): 디지탈, 아날로그 제어값
N, N_r :측정, 정격 회전수(rpm)
n : 회전수 PU값
P : 수차 축출력
Q, Q_s :수차인입, 서보제어 포트 유량(m^3/s)
T : 샘플링 시간(sec)
T_L : 발전기 부하교란
T_M :회전자 시동 시정수(sec)
T_W :수주(water column) 시동 시정수(sec)
W(s) :발전기 출력(Watt)
α, α_r :측정, 기준 안내깃 각도
α_s :안내깃 스트로크($\alpha_{max}-\alpha_{min}$)
σ :강성 귀환 계수
τ_d, τ_p :미분을 위한 Filtering 시간
τ_s, τ_t :서보 밸브, 타코메터 시정수(sec)

2. 전자식 PID 조속기 설계

마이크로 컴퓨터를 기본으로 하는 전자식 PID 조속기는 탄성 복원 조속기를 전자식으로 변환한 형태에 미분항을 추가하고, 엑츄에이터(actuator), 서보벨브(servo valve)를 포함하여 그림1과 같이 구성한다. 그림1에서는 엑츄에이터의 적분자 역할로 인해 의도한 PID 제어를 할 수 없으므로 이것을 고려한 보상 전달함수 즉 미분 연산자를 추가한다.

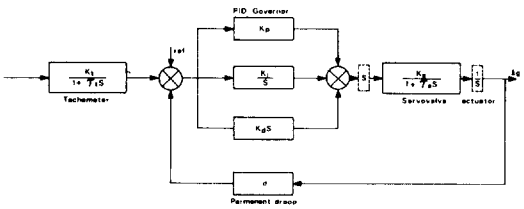


그림1. PID 조속기 구성도
Fig.1. Block diagram of PID Governor

그림1에서 라프라스 인자로 표시된 PID조속기가 마이크로 컴퓨터에 의한 디지탈 제어가 되게 하기 위해서는 후진 미분사상함수(backward difference mapping function)을 이용하였으며 그 결과식은 다음과 같이 된다.

$$m(K)=am(K-1)-bm(K-2)+cE(K)-dE(K-1)+eE(K-2) \quad (1)$$

여기서

$$a=\{(\tau_d+\tau_p)T+2\tau_d\tau_p\}/T_s$$
$$b=\tau_d\tau_p/T_s$$
$$c=\{K_iT^2+(K_p+K_i\tau_d+K_i\tau_p)T+(K_p\tau_d+K_d+K_i(K_p\tau_d+K_i\tau_d\tau_p)\}/T_s$$
$$d=\{(K_p+K_i\tau_d+K_i\tau_p)T+2(K_p\tau_d+K_i\tau_d\tau_p)\}/T_s$$
$$e=(K_p\tau_d+K_d+K_i\tau_d\tau_p)/T_s$$
$$T_s=T^2+(\tau_d+\tau_p)T+\tau_d\tau_p$$
$$E=n-\sigma g$$
$$n=\frac{N-N_r}{N_r}$$
$$g=\frac{\alpha-\alpha_r}{\alpha_s}$$

PID 조속기의 최적의 K_p, K_i 및 K_d 값을 구하기위하여 먼저 탄성복원 조속기에 대한 선행연구 결과를 이용한다.

Hovey[8]와 Schlief[9]에 의해 K_p, K_i 값은 다음과 같이 계산된다.

$$\left.\begin{aligned}&\text{Hovey; } K_p=\frac{T_m}{2T_w},\ K_i=\frac{T_m}{8T_w^2}\\&\text{Schlief; } K_p=\frac{T_m}{2T_w},\ K_i=\frac{T_m}{10T_w^2}\end{aligned}\right\}\quad(2)$$

식(2)는 $K_d=0$인 PI조속기로서, T_m과 T_w가 중요한 상수이며 다음 식으로 표시되는 값이다.

$$\left.\begin{aligned}&T_m=(2\pi N_r/60)^2\cdot\frac{J}{P}\\&T_w=\frac{l\cdot\Omega}{g_rH}\end{aligned}\right\}\quad(3)$$

이와 같은 PI 조속기에 미분항을 추가 시킬때의 미분상수가 시스템 안정성 영역에 미치는 효과는 Routh criterion법으로 해석 할 수 있으며, 이에 대하여는 5.의 결과 검토에서 설명키로 하고 여기서는 결과만을 이용키로 한다. K_d는 다음 식으로 표시된다.

$$K_d<\frac{K_p\cdot T_w}{3}\quad(4)$$

상기 식(2), (3) 및 (4)를 이용하면 K_p, K_i, K_d 값을 구할 수 있다.

한편 실제의 소수력 발전 프란트에서는 K_p, K_i 값은 식(2)로 표시된 값보다 약간 큰 값을 선택하는 것이 유리함이 본 실험에서 증명되었으며, 이에 대해서도 5. 결과 및 검토에서 논의하기로 하고 여기서는 최적의 K_p, K_i 및 K_d 값으로 다음 식들을 사용한다.

$$\left.\begin{aligned}&K_p=\frac{T_m}{T_w}\\&K_i=0.3\frac{T_m}{T_w^2}\\&K_d=\frac{1}{3}K_p\cdot T_w\end{aligned}\right\}\quad(5)$$

3. 마이크로 컴퓨터 조속기 구성 및 실험장치

마이크로 컴퓨터에 의한 조속기 구성에 있어서 복잡한 전달함수를 처리하는 데에 마이크로 프로세서의 용량에 문제가 있었으나 최근에는 마이크로 컴퓨터가 고성능화, 소형화 및 저렴화 등의 발달로 충분히 목적을 달성할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 조속기 구성은 IBM-PC 호환기종인 Tele-AT 16 비트 마이크로 컴퓨터를 중심으로 주변장치와 A / D, D / A 변환기 및 인터 페이스 등으로 그림2와 같이 구성한다. 마이크로 컴퓨터의 CPU는 Intel 80286마이크로 프로세서이며, 인터페이스 카드는 2개의 Intel 8255A 칩을 사용하여 구성하였다. 또한 A / D변환기는 12bit 연속근사 National AD 1211 칩을, D / A변환기는 12 bit National DAC1220 칩

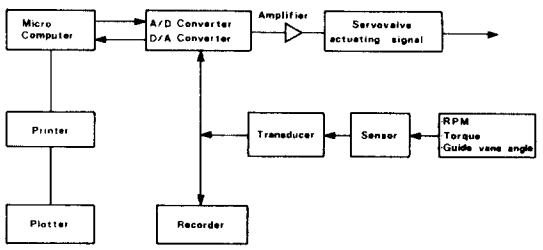


그림2. 마이크로 컴퓨터 조속기에 의한 제어시스템 구성도.

Fig.2. Block diagram of control hardware

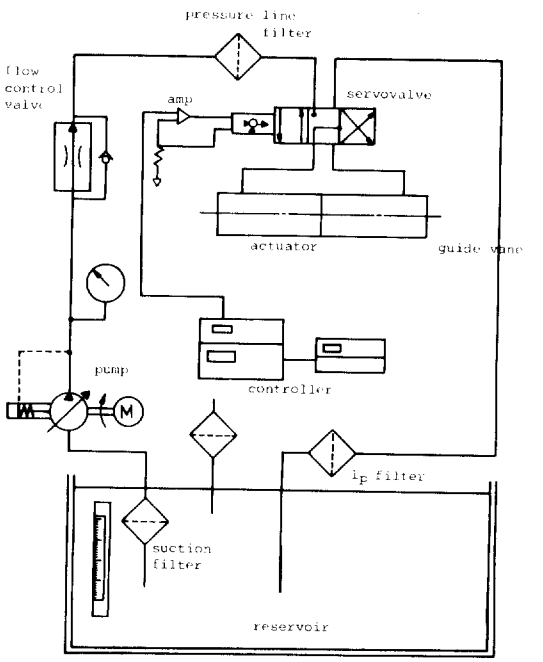


그림3. 안내깃 개도를 제어하기 위한 전기—유압 회로도

Fig.3. Schemetic diagram of electrical and hydraulic circuit for guide vane control

을 각각 사용하여 구성하였다.

이상과 같은 제어기의 제어 실행방법은 수차의 안내깃 각도를 조절하여 유량을 제어함으로서 안정된 회전수를 얻는 방법을 사용하였으며, 이를 위한 전기-유압 회로도는 그림3과 같이 하였다.

마이크로 컴퓨터 조속기의 성능을 실험하기 위한 소수력발전 시스템의 모형 실험장치는[11] 5 KW 급 수차 발전기, 상·하수조 탱크(최대낙차 7m) 및 수압관(ϕ 30cm), 시스템 상태 측정용 센서, 트란스듀서 및 마이크로 컴퓨터 조속기로 구성된다. 수차는 튜브형 프로펠러식 4익형 수차로서 전단에 9익의 안내깃 개도로 유량을 제어하도록 되어 있으며, 발전기는 3상 동기 발전기로서 정격회전수가 900 rpm이다. 발전시스템의 상태 측정기기들로서는 타코·토크 메터(KST-20, DTM408, Onosoki), 회전위치계(Moog 010-73251), 차압변압계(DP-4E-12-MB Standard Co.), 유량계(Annubar flow sensor, ANR 76, Dieterich Standard Co.) 등을 사용하여, 회전수, 출력토오크, 안내깃 개도, 낙차 및 유량 등을 측정하여 A/D 변환기를 통해 컴퓨터에 입력시켰다. 또한 제어 결과에 대한 출력의 기록은 고속도의 mult-pen recorder(CNO RE 8105, Rikadenki Kogyo Co.)를 사용하였다.

실제 실험에 필요한 정격상태 및 제어기에 필요한 상수들은 표1과 같다.

4. 수차발전 시스템 모델링 및 안정도 해석 방법

마이크로 컴퓨터 조속기의 성능을 예측하고, 안정성을 판정키 위하여 먼저 발전 시스템의 수학적 모델링이 필요하다. 본 발전시스템은 i) 수차—수압관 ii) 조속기, iii) 서보벨브, iv) 발전기 회전자로 구분하여 모델링 하기로 한다.

먼저 수차—수압관의 전달함수는 Woodward[12], Thorne[13] 등에 의해, 수차—수압관을 이상적인 오리피스로 가정하고, 비탄성 수주이론(non-elastic water column theory)을 이용하여 ($\frac{1-T_w s}{1+0.5G_o T_w s}$)로 구하여졌다. 그러나 이 식은 안내깃의 수문 개도(%)를 고려치 않았으며, 이상적인 상태에서 유도된 식이므로, 이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 실험치로 수정된 다음과 같은 식을 사용한다.

$$\frac{m}{g}=\frac{a_{23}(1-G_o T_w s)}{1+0.5\ G_o T_w s} \tag{6}$$

전기—유압식 서보벨브의 전달함수는 다음과 같이 된다.

$$\frac{Qs}{g}=\frac{Ks}{1+\tau_s s} \tag{7}$$

여기서 G_o는 %로 나타낸 수문의 개도이며, a_{23}는 토오크의 수문개도에 대한 변화율 $\left(=\frac{\partial m}{\partial g}\Big|_0\right)$ 로서 실험치이다.

발전기는 회전체에 대한 운동 방정식으로부터 출발하여, 수차에 주어지는 토오크와 발전기 출력과의 관계는 다음과 같이 된다.

$$\frac{w(s)}{m(s)}=\frac{1}{T_m s+D} \tag{8}$$

이상을 종합하여 앞서 설명된 마이크로 컴퓨터 조속기를 포함한 발전시스템의 전체 block diagram은 그림4와 같이 된다.

PID 조속기의 안정성과, 앞서 설명된 조속기 설계에 필요한 최적의 미분 상수를 구하기 위해서는 그림1과 그림4에 표시된 전체 시스템의 선형식 들에 대하여 Routh criterion방법으로 안정성 영역을 구하여야 한다.

먼저 각 변수를 간략화 하기 위하여 다음과 같은 무차원 수를 사용한다.

$$\tau=\frac{t}{T_w},\ q=\frac{d}{d\tau}=T_w s,\ L_1=\frac{K_p T_w}{T_m},$$
$$L_2=K_i\ T_w{}^{n} K_p{}^{n},\ L_3=\frac{DT_w}{T_m},\ L^4=\sigma\frac{T_w}{T_w},$$
$$L_5=\frac{K_d}{K^p K^w} \tag{9}$$

표 1. 소수력발전 제어실험의 정격 및 제어상수
Table 1. Rated conditions and coefficients for the control experiment

낙차	유량	회전수	T_w	T_m	τ_s	σ
5m	0.18m³/s	900 rpm	0.33 sec	7.5 sec	0.015 sec	0.05

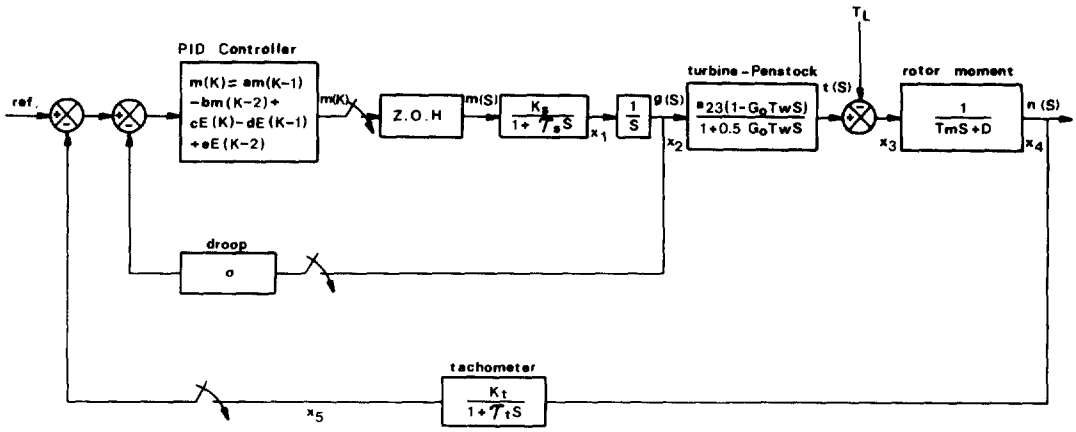


그림4. 마이크로 컴퓨터 PID 조속기를 포함한 소수력발전시스템 블록 선도

Fig.4. Block diagram of the hydro turbine generating system with microcomputer based PID control.

식(9)를 이용하여 그림5의 전달함수를 표시하면 다음과 같이된다.

$$T(q)=\frac{A(q)\cdot B(q)\cdot c(q)}{1+A(q)\cdot B(q)\cdot c(q)} \qquad (10)$$

여기서, $A(q)=\frac{L_1L_5q^2+L_1q+L_1L_2}{L_1L_4L_5q^2+(q+L_1L_2L_4)}\cdot\frac{T_m}{T_w}$

$$B(q)=\frac{1-q}{1+0.5q}$$

$$C(q)=\frac{T_w}{T_m(q+L_3)}$$

상기 식(10)에서 특성방정식을 구할 수 있다. PID 제어계수가 안정성 영역에 미치는 효과를 보기 위해 $L_3=L_4=L_5=0$으로 하면 L_1, L_2 즉 PI 조속기의 K_p와 K_i에 의한 안정성 영역이 구하여지며, $L_3=L_4=0$으로 하면 PID 조속기에서의 K_p, K_i, K_d 크기에 의한 안정성 영역이 구하여진다.

그림 4에 표시된 소수력 발전시스템의 안정도 해석과 시뮬레이션은 실험에서와 마찬가지의 정격상태를 이용하였으며 그외 필요한 상수들은 표2와 같다. 또한 시뮬레이션에서는 실험과 같이 전기적 부하를 스텝 함수로 23 pu바꾸어 주었을 때의 특성을 계산하였으며, 샘플링 시간은 0.3초로 수행하였다.

5. 결과 및 검토

PID 조속기 설계에 있어서, 미분상수를 잘못 선정하거나 너무 크면 시스템이 불안정하여질 수도 있으

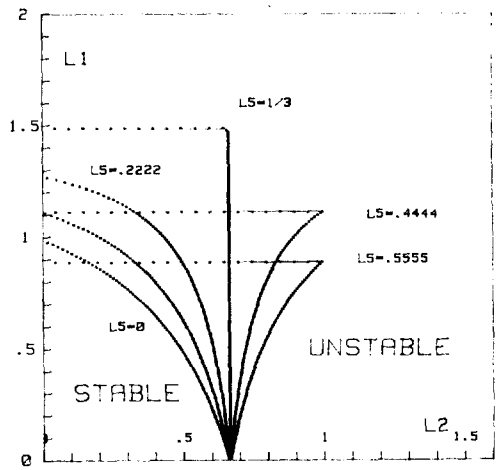


그림5. $L_3=L_4=0$ 일때의 L_5 변화에 대한 안정성 영역

Fig.5. Stability limit curves for various values of L_5 at $L_3=L_4=0$

므로 이의 최적값을 구하기 위하여 PID상수들로 표시되는 $L_3=L_4=0$ 일때의 안정성 영역을 K_d와 관계되는 L_5를 변화시켜 구하여 나타낸 결과가 그림5이다.

그림5에서 볼 수 있듯이 $L_5=0$ 일때, 즉 기존의 기계 유압식 PI 조속기 안정성 영역보다 L_5 값을 준 PID 조속기의 안정성 영역이 증가됨을 알 수 있으며, 더우기 $L_5=\frac{1}{3}$일 때 가장 좋은 안정성을 얻을 수 있다. 그러므로 PID 조속기 설계에서 식(4)와 같은 K_d 값

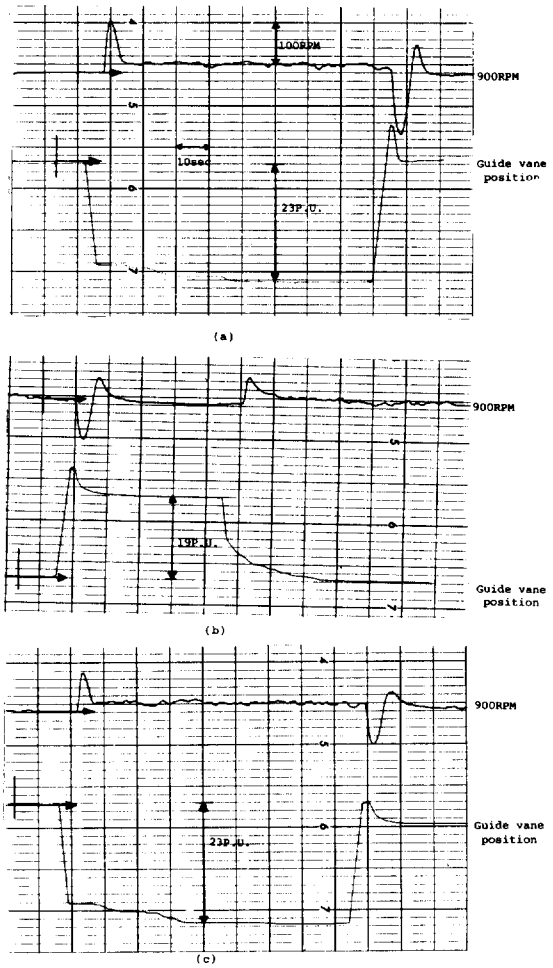


그림6. 부하변화시 Hovey 식 조속기(a), Schleif식 조속기(b) 및 Hovey식에 K_d추가한 조속기(c)의 응답특성 실험결과

Fig.6. Responses of Hovey PI governor(a), Schleif PI governor(b) and Hovey governor with K_d(c) to load variation by model plant's experiment.

을 구하는 식을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 마이크로 컴퓨터 조속기의 장점을 살려서 PI 제어기와 PID 제어기를 프로그램에 의해 구성하여 실제 프란트에서 성능 실험을 하여 보았으며, 그 결과가 그림6(a), (b), (c)에 표시 되어 있다. 그림6에서는 부하가 증가할 때 제어 결과 안내깃 개도가 열리는 방향으로 움직인 결과가 오른쪽에 있으며, 그 반대 결과가 왼쪽에 나타나 있다. 또한 그림6에

표 2. 시뮬레이션 상수

Table 2. Coefficients for the simulation

K_t	K_s	a_{23}	D	G_o	τ_s
1	0.012	1.3	2.0	0.65	0.015

서 (a)는 Hovey,[8] (b)는 Schleif[9]씨에 의해 주어진 PI 게인을 사용한 결과이며, (c)는 Hovey씨의 PI 조속기에 $K_d(=\frac{1}{3}K_pT_w)$를 추가한 경우의 실험 결과이다.

Schleif씨의 PI조속기에 K_d를 추가 했을 경우도 비슷한 결과를 얻었다.

그림6(a), (b), (c)에서 볼 수 있듯이 PI 조속기에 미분항을 추가한 경우 반응시간이나 과도특성이 많이 개선됨을 볼 수 있다. 그러나 단순히 K_d만 추가하는 조속기가 최적상태라고 볼 수 없으므로, 앞에서 설명된 식(2) 및 (4)에 기본을 두고 각 PID 상수를 약간씩 바꾸어 주면서 많은 실험을 수행한 결과 식(5)와 같이 K_p, K_i 값이 Hovey나 Schleif에 의한 식보다 약간 클 때 가장 좋은 제어 특성을 얻을 수 있었다.

실험의 조건은 좋은 안정성을 확인한 값 $L_5=\frac{1}{3}$을 고정하여 놓고 가장 짧은 Settling time을 갖는 K_p, K_i 값을 찾기 위하여, 그림5.에서의 L_1, L_2의 안정범위인 $0<L_1<1.5$ 및 $0<L_2<0.66$까지 많은 실험을 하여 식(5)를 얻게 되었다.

식(5)에 대하여 정량적으로 최적상태임을 증명키는 어려우나, 안정성 영역 계산으로 입증할 수 있다.

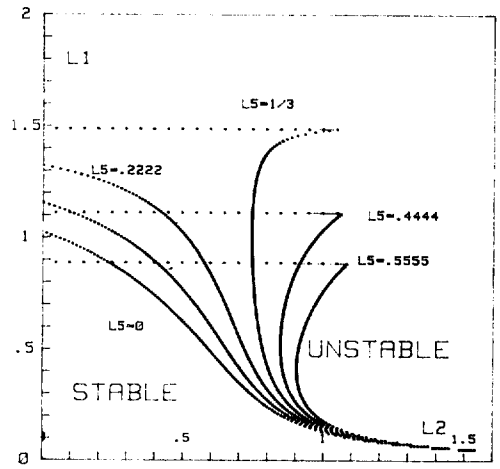


그림7. $L_3=0.08$, $L_4=0$ 일때의 L_5 변화에 대한 안정성 영역

Fig.7. Stability limit curves for various values of L_5 at $L_3=0.08$, $L_4=0$

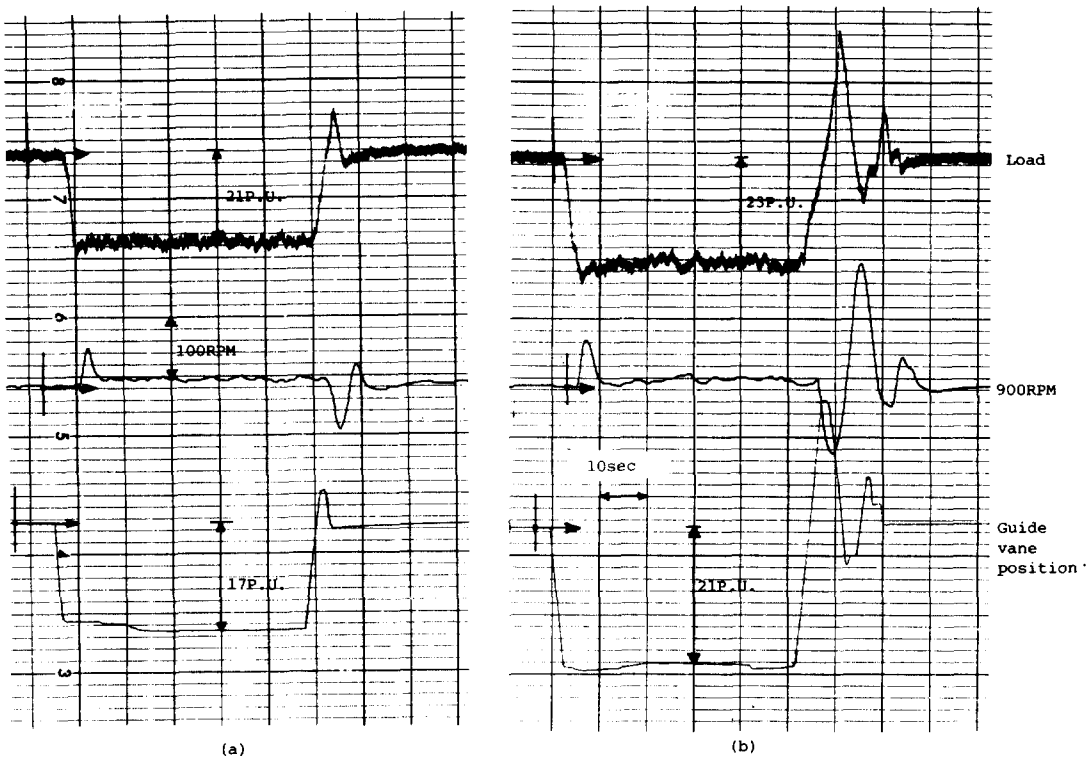


그림8. 최적의 PID 상수를 갖는 조속기의 응답특성 (a)과 K_d가 클 경우의 응답특성(b)

Fig.8. Responses of optimum PID governors(a) and PID governor with large value of K_d(d).

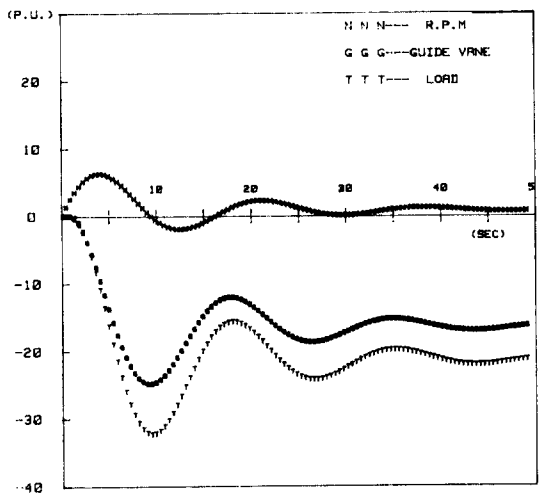
즉, Hovey나 Schleif식은 K_d=0인 상태이며, 여기에 K_d를 추가하면 그림5와같이 안정된 K_i, K_p 값의 사용영역 즉, L_1과 L_2의 안정성 영역이 넓어지게 됨을 볼 수 있다. 이러한 상태에 L_3를 고려하면 안정성 영역이 더욱 넓어질 것임을 알 수 있으며, L_3=0.08로 하여 안정성 영역을 구한 결과를 그림7에 보였다. 그러므로 최적값은 넓어진 안정 영역에서 구하여야 타당하며 안정성 영역 확장 경향에 따라 K_d가 증가 될 때는 K_p와 K_i도 증가된 값이 최적값이 되게 된다.

이상과 같은 해석 및 실험결과로부터 식(4)와 식(5)가 PID 조속기의 최적상수를 구하는 식이라고 볼 수 있으며, 이 식들에 의해 실험한 결과가 그림8(a)이다. 그림8(b)에서는 비교를 위하여 K_d가 큰 경우의 실험결과를 나타냈다. Hovey식 결과인 그림6(a)와 그림8(a)을 비교하여 보면, 부하 감소시 복귀시간은 1.4 sec 정도 빠르며, 오버슈트는 4 pu 정도가 개선됨을 알 수 있다. 그림8(a)에서 오버슈트가 약간 큰 것은 본 실험장치가 5 KW 급의 소형 모델 프란트이기 때문에 회전자 관성력이 적어서 생긴 결과라고 생각되며, 이를 낮추기 위해서는 수차—발전기에 Flywheel을 설치하면 개선 될 것이다. 그러나 본 조속기를 실제의 대형 프란트의 사용한다면, 관성력이 커지기 때문에, 이 문제는 해결될 것으로 볼 수 있다. 또한 K_d가 아주 클 경우에는 그림8(b)에서 볼 수 있듯이 특성이 나빠지므로 식(4)에 표시된 한계값 이상을 취하면 나쁘다.

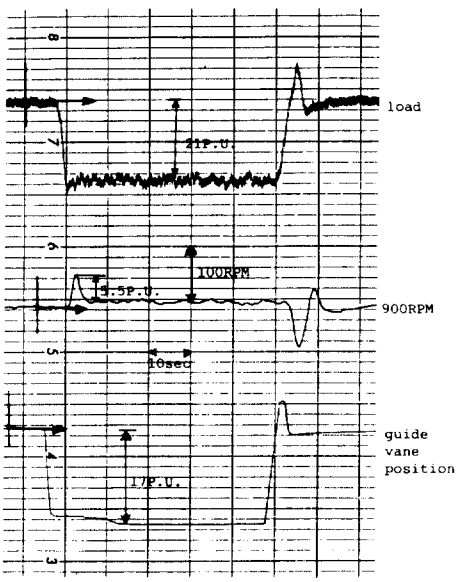
한편 Sanathanan[14]씨는 PI 조속기 이후와 발전 프로세스 이후를 연결하는 inner loop를 만들어 주면, PI에 미분항 첨가시 보다 더욱 우수한 제어기가 된다는 보고가 있어서, 본 실험에서도 이를 시도하여 본 결과, 약간의 반응시간 개선 효과를 보았으나 특별한 효과는 보지 못하였다.

그림4에 나타난 전체의 발전시스템에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 결과와, 같은 조건으로 실험한 결과를 그림 9(a), (b)에 나타내었다. 이 결과는 앞서 설명된 최적의 PID상수들과 시스템 정격하에서 부하 변화를 스텝함수로 23pu 변화를 주었을 때의 주파수와 안내깃 개도의 특성을 본 결과이다. 그림9(a), (b)에

서 볼 수 있듯이, 시뮬레이션과 실험 결과는 정성적으로 일치함을 알 수 있다. 그러나 실험결과가 반응시간은 빠르며, 오버슈트는 크게 나타났다. 이러한 이유는 시스템 모델링에서 수차 수압관 전달함수를



(a) simulation results



(b) experimental results

그림9. 마이크로 컴퓨터 조속기를 갖는 소수력발전 시스템의 제어 시뮬레이션(a)과 실험결과(b)

Fig.9. Simulation and experiment results of the hydro turbine generating system with microcoputer based PID governor.

구하는 과정에서 선형화된 식과 실제의 전달함수와의 차이 때문으로 생각된다. 실제로 Murty[15]씨는 약간 변형된 전달함수를 사용한 예가 있다. 그러나 이 문제에 있어서는 더욱 연구되어 정확한 전달함수를 구해 해석적으로 수력발전 시스템의 제어 특성을 예측할 수 있어야 될 것으로 생각된다.

6. 결 론

본 연구를 통하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 기존의 기계식 탄성복원 조속기보다 우수한 마이크로 컴퓨터 PID조속기가 개발되었으며, 그 우수성을 실제의 소수력 발전 모델 프란트에서 실험 결과로 증명하였다.
2) PI조속기와 PID 조속기 성능을 이론적인 안정도 영역해석과, 실험적 결과로서 검토하였으며, 가장 특성이 좋은 최적의 PID상수를 결정하는 식을 찾아냈다.
3) 마이크로 컴퓨터에 의한 디지탈 조속기 및 관련된 시스템의 hardware, software의 연구결과는, 소수력발전소에 적용은 물론 일반적인 발전 프란트에서도 경제적인 출력제어의 기초 기술로서 응용이 가능하다.
4) 소수력 발전 프란트의 선형화된 수학적 모델식을 사용한 시뮬레이션 결과를 통해 제어 성능을 예측할 수 있게 되었다. 그러나 좀 정확한 시뮬레이션을 위해서는 시스템을 정확하게 표현할 수 있는 전달함수가 연구되어야 할 것으로 생각된다.

REFERENCE

1) L.M.Hovey., "Optimum adjustment of governors", The Engineering Jour., pp.64-71, Nov. 1960.
2) P.A.Frick., "Automatic control of small hydroelectric plant", IEEE Trans. power Apparatus and System, Vol. PAS-100, No.5, pp.2476-2485, 1981.
3) P.C.Callan and J.Kure Jensen, "Advanced turbing-generator control", IEEE Trans. Power Apparatus and System, Vol. PAS-101, No.8, pp.2498-2503, 1982.
4) D.Findlay, et al., "Microprocessor-based water turbine governor", IEE Proc., Vol.127, Pt.C.No. 6, pp.360-369, 1980.

5) D.H.Thorene and E.F.Hill, "Extensions of stability boundary of a hydraulic turbine generator unit", IEEE Trans. Power Apparatus and System, Vol. PAS-94, No.4, pp.1401-1408, 1975.

6) P.V.Ramana and P.S.R.Murty, "Modeling identification and optimal control of hydro governor system", IE(I) Jour.-EL, Vol.60, pp.53-58, 1979.

7) V.Ramamurthi, et al., "Transient Performance and control of hydraulic turbine-generator units", IEEE Trans. Power Apparatus and System, Vol. PAS-100, No.1, pp.288-294, 1981.

8) L.M.Hovey.,"Optimal adjustment of hydro governors on Manitoba hydro system", AIEE Trans. Vol.81, Part III, pp.581, 1962.

9) F.R.Schlief, "The coordination of hydraulic turbine governors for power system operation", IEEE Trans. Power Appratus and System, Vol. PAS-85, pp.750-758, July 1960.

10) C.L.Clemans, et al., "An electric conversion for mechanical-hydraulic governors of water wheel turbines", PB 80-116759 or Report No. REC-ERC-79-16, Dec. 1979.

11) 신 동열 외, "소수력 발전 시스템 개발", 한국동력자원연구소 연구보고서 KE-85-2, 1985년 12월.

12) J.L.Woodward, "Hydraulic-turbine transfer function for use in governing studies", PROC IEE, Vol.115, No.3, pp.424-426, 1968.

13) D.H.Thoron and E.F.Hill, "Field testing and simulation of hydraulic turbine governor performance", IEEE PES Summer Meeting and EHV / UHV Conference, Vancouver, Canada, July 15-20, pp.1183-1191, 1973.

14) C.K.Sanathanan, "Double loop control of a hydro turbine unit", Water Power & Dam Construction pp.25-27, Dec, 1986.

15) M.S.R.Murty and M.V.Harihara, "Analysis and improvement of the stability of hydro turbing generating unit with long penstock", IEEE Trans. Power Appratus and System, Vol. PAS-103, No.2, pp.360-367, 1984.