

마이크로 컴퓨터를 사용한 소수력발전소 자동화 시스템 개발

신 동 열[○] 이 원 용 박 완 순
한국동력자원연구소

Microcomputer-based Automatic Control System
for Small Hydro Power Plant

Dong Ryul Shin Won Yong Lee[○] Wan Soon Park
Korea Institute of Energy and Resources

1. 서 론

소수력발전은 순수한 부존자원이며, 무공해 자연에너지이며, 장기간동안 안정된 전력을 값싸게 공급할 수 있는 등 장점이 많으므로 우리나라도 최근 대체에너지 개발 측면에서 관심이 높은 분야이다.

소수력발전소 개발에 있어서는 가능한 한 발전소의 제어 및 감시 시스템을 자동화하여 경제성을 높여야 한다. 이러한 자동화에는 크게 보아서 출력제어와 운전제어로 구분할 수 있으며 종래에는 이를 분리하여 사용함으로써 시스템이 복잡하고 가격도 비싼 결점이 있었다.

출력제어는 양질의 전력을 발전기 위해 수요측 부하변화나 저수지낙차 및 유량변화에 기인하는 수차발전기의 회전수 변화를 최소화하기 위한 제어이며 이를 위해서는 반응이 빠른 조속기가 필요하다. 기존의 방식으로는 기계 유압식인 탄성복원조속기(temporary droop governor)⁽¹⁾가 있으며 이는 일종의 PI 조속기로서 안정성과 신뢰성은 있으나 부하변화에 대한 반응이 느린 단점이 있으며, 또한 주 제어시스템과 연계제어를 할 수 없었다.

한편 소수력발전의 경우 발전용량이 작기 때문에 작은 부하변화에도 민감한 반응 및 반응성이 빠른 제어가 요구되며, 이의 실현을 위해서는 마이크로 컴퓨터를 사용하여 디지털 제어방식에 의한 전자식 조속기가 적당할 것이다.⁽²⁾ 운전제어는 발전소의 시동, 정지, 비상정지 및 감시보호제어 등의 순차(Sequence)제어를 의미하며 종래에는 기계적인 계전기 또는 프로그래머블 컨트롤러를 사용하였다. 그러나 앞서 설명된 출력제어에 마이크로 컴퓨터를 사용하면 운전제어까지 단일의 컴퓨터에 의해 수행이 가능할 것이므로, 소수력발전소의 문제점인 경제적 운영이 가능케 될 것이다. 그러므로 본 논문에서는 소수력발전소의 안전 자동화를 위하여 마이크로 컴퓨터와 유압식 서보밸브를 사용하여 반응성과 민감도를 향상시킨 전자식 PID 제어기를 개발 실험함과 동시에, 시동 정지 등의 운전제어도 단일의 마이크로 컴퓨터 제어기에 의해 수행할 수 있도록 하였으며 그 성능을 실험한 결과를 보고한다.

2. 자동화 시스템 및 실험장치 구성

소수력발전소의 자동화 실험을 하기 위한 발전시스템의 모델프란트는 i) 5 KW 급 수차-발전기, ii) 시스템상태 측정용 센서 및 트랜스듀서 및 마이크로컴퓨터 조속기, iii) 최대낙차 7m 의 상.하수조 탱크 및 직경 30 cm 의 수압관으로 구성하였다.

수차는 튜브형 프로펠러식 4익형 수차로서 전단에 9익의 안내깃(guide vane) 개도로 유량을 제어토록 되어있으며, 발전기는 3상 동기발전기로서 정격회전수는 900 rpm 이다.

발전시스템의 상태측정기 들로서는 타코-토크메터(KST-20, DTM 408, Onosoki), 회전위치계(Moog 010-73251), 차압변압계(DP-4E-12-MB St. Co.), 유량계(Annubar flow sensor, Dieterich St. Co.) 등을 사용하여 회전수, 토오크, 안내깃 개도, 낙차 및 유량 등을 측정하여 A/D 변환기를 통해 컴퓨터에 입력시켰다. 주 제어기로서의 마이크로컴퓨터는 IBM-PC 호환기종인 Tele-At 16 비트 마이크로 컴퓨터로서 CPU 는 Intel 80286 이다. 인터페이스카드는 2개의 Intel 8255A 칩을, A/D 변환기는 12 bit National AD 1211 칩을, D/A 변환기는 12 bit National DAC 1220 칩을 사용하여 구성하였다. 이상의 모델프란트 제어시스템 회로도들 그림 1에 보였다.

한편 단일의 마이크로 컴퓨터를 이용한 제어기로서 발전 시스템을 완전자동화 하기 위하여는 (i) 시동, 정지 및 비상정지를 위한 순차제어 프로그램, (ii) 출력제어를 위한 PID 프로그램, (iii) 시스템 보호.감시를 위한 보호계전 프로그램 및 (iv) 데이터 처리 분석 프로그램 등 4 가지 기능을 수행할 수 있는 software 가 요구되며 본 연구에서는 이들을 개발하여 수행하였다.

3. PID 디지털 출력제어기

기존의 기계.유압식 탄성복원 조속기⁽³⁾의 동 특성상과 자동화도를 높이기 위하여 그림 2와 같은 디지털 PID 제어기를 이용하여 출력제어기를 구성하였다. 여기서 사용된 제어계수들은 시스템을 선형식으로 모델링하여 안정도 해석을 통해 기존의 제어기에서 사용된 최적값들보다 약간 큰 P.I.

계수에 미분계수를 추가시키는 형태로 구하였다 (4).
본 실험에서 사용된 비례, 적분 및 미분계수의 값은 다음 식으로부터 구한다.

$$\left. \begin{aligned} K_p &= 0.8 T_w/T_m \\ K_i &= 0.3 T_w/T_m^2 \\ K_d &\leq \frac{1}{3} K_p/T_w \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 T_m 과 T_w 는 회전자 시동 시정수 (Mechanical starting time)와 수주 시동시정수 (Water column Starting time)으로서 다음 식으로 표시된다 (4).

$$\left. \begin{aligned} T_m &= \left(\frac{2\pi N}{60}\right)^2 \cdot \frac{J}{P} \\ T_w &= \frac{Q \cdot L}{g_r H} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 N 은 회전자 정격회전수, J 는 회전자 극관성 모멘트, P 는 수차축 출력, L 은 수압관 길이, Q 는 수차 인입유량, g_r 는 중력, H 는 낙차를 나타낸다.

그림 2에서 점선내의 부분이 컴퓨터에 의한 디지털제어 구성부분으로서 액튜에이터 ($\frac{1}{S}$)를 포함하여 P.I.D 제어기가 되기 위해 미분 연산자 S 를 더 추가시킨 것을 알 수 있다. 또한 서보밸브의 개인은 컴퓨터에 의해 조정 가능하므로 디지털 제어기에 포함시켰다.

그림 2에서 타르타스 인자로 표시된 PID 제어가 컴퓨터에 의한 디지털제어가 되기 위해서는 후진 미분사함함수 (backward difference mapping function)를 이용하여 다음과 같은 차분식으로 만들어 사용하였다.

$$m(K) = am(K-1) - bm(K-2) + cE(K) - dE(K-1) + eE(K-2) \dots\dots\dots (3)$$

여기서

$$\begin{aligned} a &= \{(T_d + T_p)T + 2T_d T_p\} / T_s \\ b &= T_d T_p / T_s \\ c &= \{K_i T^2 + (K_p + K_i d + K_i T_p)T + (K_p T_d + K_d + K_i T_d T_p)\} / T_s \\ d &= \{(K_p + K_i T_d + K_i T_p)T + 2(K_p T_d + K_d + K_i T_d T_p)\} / T_s \\ e &= (K_p T_d + K_d + K_i T_d T_p) / T_s \\ T_s &= T^2 + (T_d + T_p)T + T_d \cdot T_p \\ E &= n - og \\ n &= \frac{N - N_r}{N_r} \\ g &= \frac{\alpha - \alpha_r}{\alpha_s} \end{aligned}$$

식에서 $m(K)$ 는 디지털 제어값, T_d , T_p 는 미분을 위한 filtering 시간, T 는 샘플링 시간, E 는 에러신호, n 은 회전수 PU 값, σ 는 감성회환계수, g 는 수차안내깃 개도 PU 값, α 는 측정안내깃 각도, α_r 는 기준안내깃 각도, α_s 는 안내깃 스트로크를 나타낸다.

4. 시퀀스 제어 프로그램

소수력발전소의 운전은 시동, 정지 및 정격 운전상태로 구분할 수 있다. 시동은 처음 수차발전기가 정지되어 있는

상태로부터 일정 주파수와 일정 전압으로 발전되어 부하에 연결시켜 주는 과정이며, 정지는 보호계전 시스템이 작동되어 비상정지하거나, 보수 점검 등을 위해 운전을 중지시키는 과정이다. 이와 같은 시동 및 정지과정의 시퀀스는 그림 3과 같다. 한편 정격 운전상태는 출력제어 상태로서 앞서 설명된 PID 제어방법으로 일정한 출력을 내기 위해 발전기 회전자가 정격 회전수가 되도록 제어하는 상태이다.

5. 실험 및 검토

앞서 설명된 과정을 통해 개발된 마이크로 컴퓨터를 이용한 소수력발전소 자동화 시스템의 실험은 시동시퀀스 제어 실험과 출력제어 실험 및 정지시퀀스 제어실험을 순차적으로 수행하였다. 실험을 위한 모델프란트의 정격 실험 상태는 다음 표와 같다.

표 1. 모델 프란트의 정격 상태

H	Q	N	T_w	T_m
5 m	0.18 m ³ /s	900 rpm	0.33 sec	9.4 sec

시동은 앞서 설명된 흐름으로 주밸브, 안내깃, 자동전압조정기 및 부하차단기 등을 컴퓨터로 자동 조정하여 수행되며 그 결과를 그림 4에 나타냈다.

그림 4에서와 같이 프로그램에 의한 컴퓨터 명령으로 안내깃을 무부하 개도(약 15°)로 고정시킨 후 주 밸브를 서서히 열어 회전수를 증가시킨다. 이 경우 주 밸브가 완전히 열린 상태에서도 회전수가 자동전압 조정기로 발전기에 여자 신호를 주는 범위에 있지 않기 때문에 안내깃에 의해 회전수를 증가시켜 회전수가 정격의 90%가 될 때 자동전압 조정기를 통해 여자시키고, 전압이 안정된 후 부하에 연결된다. 그림 4에서 (1), (2)의 변곡점이 나타나는 것은 무부하상태에서 여자와 부하가 연결될 때와 주 밸브가 완전히 열린 후 안내깃이 구동되기 때문이다.

정지에 관한 실험도 앞서 설명된 흐름도에 의해 수행하였으며 그 결과가 그림 5에 표시되었다. 그림에서 볼 수 있듯이 시동시보다 진행시간이 빠름을 볼 수 있다. 그 이유는 시동시에는 rpm 값을 귀환신호로 받아 수압관내의 물의 관성력을 고려하여 적당한 지연시간을 주면서 주 밸브와 안내깃을 열어주는 반면 정지는 시퀀스대로 최대한 빨리 기기들을 작동시키기 때문이다. 그림 5에서 변곡점이 나타나는 이유는 시동시와 마찬가지로 여자와 부하가 거의 동시에 떨어져 무부하 상태로 들어가기 때문이다. 출력 제어실험은 전기적인 부하를 스텝함수로 바꾸어 주면서 주파수의 안정된 복귀 정도를 보았다. 본 실험에서는 비교를 위해서 기존 제어기인 PI 제어기와 (그림 6-a) PID 제어기를 각각 컴퓨터로 구성하여 미분항이 추가됐을 때의 효과를 보았으며 그 결과를 그림 6-b 에 보였다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 미분항이 추가된 경우가 반응시간이나 과도응답의 특성이 개선됨을 알 수 있다. 한편 그림 6-b에서 오버슈트가 약간 큰 것은 본 모델 실험참치가 소형이기 때문에 회전자 극 관성력이 적어서 생긴 결과라고 보면

이는 수차발전기에 Flywheel 을 설치하면 개선될 것이다. 또한 본 실험에서는 미분계수를 식(1)에 표시된 값 이상으로도 실험하여 보았으며 그 결과는 좀지 못함이 판명되었다.

6. 결론

본 연구를 통해 소수력 발전소에 사용할 수 있는 단일의 마이크로 컴퓨터를 이용한 디지털 자동제어 시스템을 개발하였으며, 시동 정지 등의 발전소 운영 자동화 기술의 기반을 확립할 수 있었다. 또한 출력제어에 PID 제어기를 사용함으로써 기존의 제어기보다 우수한 특성을 얻을 수 있었다.

참고 문헌

- 1) L.M. Hovey., "Optimum adjustment of governors", The Eng. J., pp.64-71, Nov. 1960.
- 2) P.C. Callan., "Advanced turbine-generator control", IEEE Tr. PAS., Vol. PAS-101, No.8, pp.2498-2503, 1982.
- 3) F.R. Schrief, "The coordination of hydraulic turbine governors for power system operation", IEEE Tr. PAS, Vol. PAS-85, pp.750-758, 1966.
- 4) 신동열외, "소수력 발전 시스템 개발" 동자연보보고서 KE-85-2, 1985.

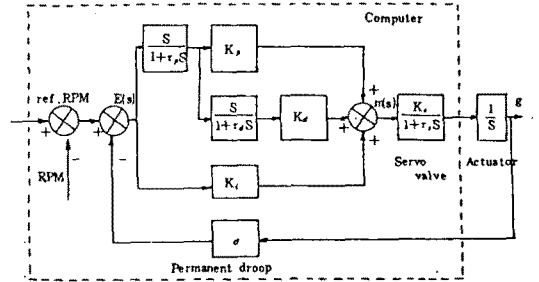
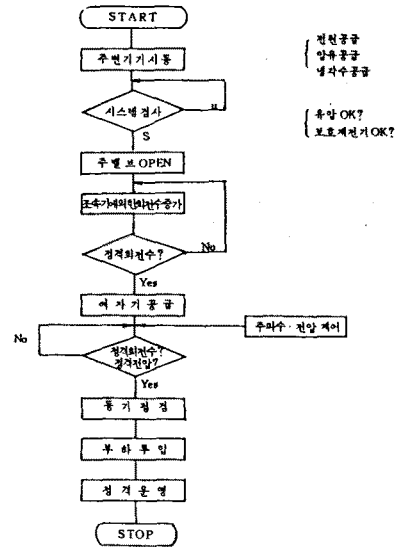
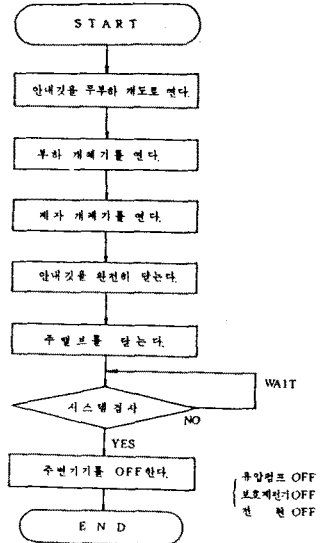


그림 2. PID 디지털 조속기



(a)



(b)

그림 3. 발전기시동 (a), 및 정지 (b) 시퀀스 흐름도

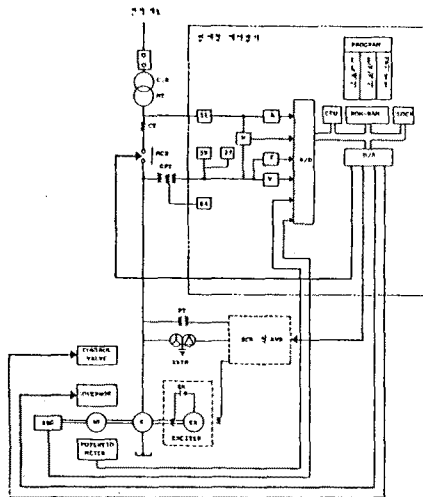


그림 1. 모델프란트 제어시스템 회로도

- SSG 속도 신호 발생기
- WT 수차
- G 발전기
- EX 교류여차기
- SR 정류기
- EXTR 여차용 변압기
- GPT 기차 전압 변성기
- PT 계기용 변압기
- CT 계기용 변류기
- A/D A,D 변환기
- D/A D,A 변환기
- CPU 전신처리장치
- ROM Read Only Memory
- RAM Random Accessory Memory
- W 전역제
- A 전류계
- F 수위수계
- V 전압계
- ZI 교류 기전압 계전기
- SI 과전류, 제전기
- 59 과전압 제전기
- 64 지차 과전압 제전기

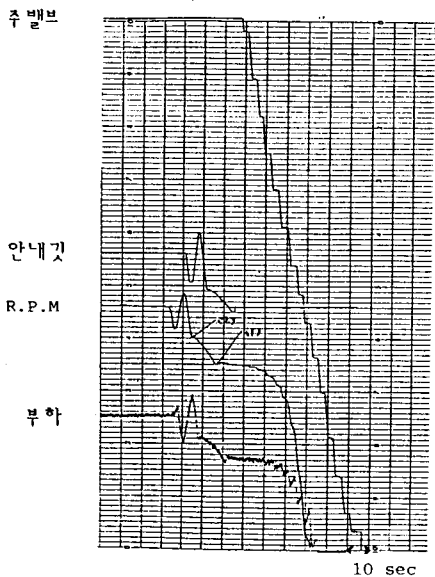
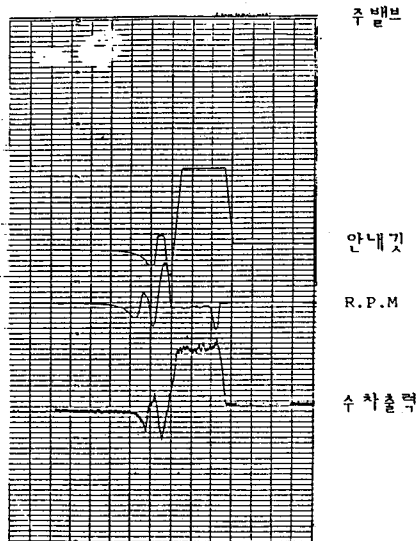


그림 4. 조속기가 정격출력 제어변수를 가질때의 시동



(a)

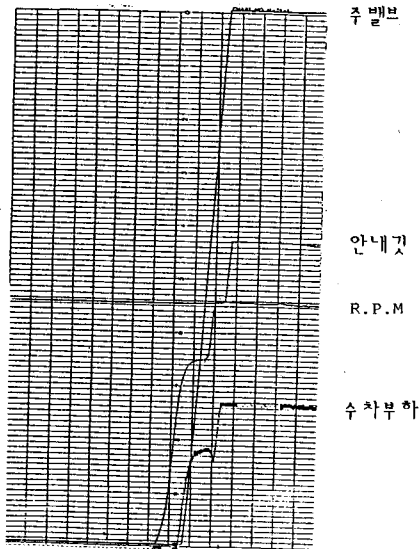
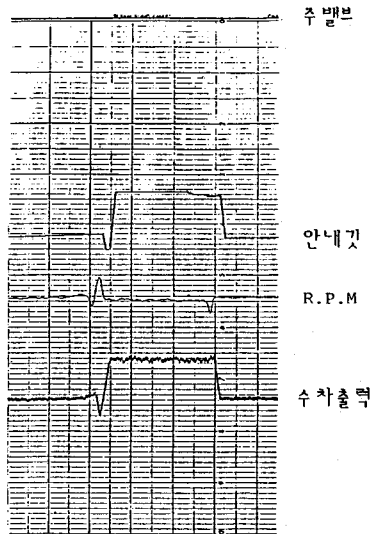


그림 5. 정지일 때의 특성



(b)

그림 6. PI 조속기(a), 및 PID 조속기(b)의 특성 (부하 23 PU 변화시)