

# 자동 동조 퍼지 제어를 이용한 수력발전소 주파수 제어

이선근<sup>1</sup> 이원용 신동일  
한국에너지기술연구소

권오석\*  
\*충남대학교 컴퓨터공학과

## Frequency Control of Hydro Power Plant Based on Automatic Tuning Fuzzy Controller

Seon-Geun Lee Won-Yong Lee Dong-Ryul Shin  
Korea Institute of Energy Research

Oh-Seok Kwon\*  
\*Chungnam Nat'l Univ.

**Abstract**-This paper proposes an automatic tuning fuzzy controller for frequency control of a hydro power plant (HPP). The proposed automatic tuning fuzzy controller consists of fuzzy control part and scaling factor calculation part. Scaling factor tuning is based on the concept of conventional tuning rules for the PI controller. The proposed controller was evaluated by simulation. Good results have been obtained for the 5kW model HHP.

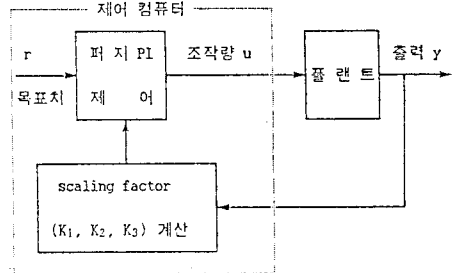


그림 1 자동 동조 퍼지 제어기의 구성도

### 1. 서론

수력발전소에서 발전되는 출력(전압, 주파수)을 안정되게 얻기 위해서는 부하변동 등에 기인하는 수차발전기의 출력상태를 제어하기 위한 조속기가 필요하다. 지금까지 탄성복원 조속기(temporary droop governor)를 많이 사용하여 왔으며 이것은 일종의 PI제어기로 기계유압식 조속기이므로 간단하고 내구성은 양호하나, 안정성과 민감도가 떨어지는 단점이 있다.[1]

본 논문에서는 수력발전소 출력 주파수 제어를 위하여 반복적인 학습이 필요없는 자동 동조 퍼지 제어를 제안한다. 자동 동조 퍼지 제어기는 크게 제어부와 scaling factor 계산부의 2가지 기능으로 나뉜다. 제어부에서는 기존의 PI형 퍼지 제어를 채택하였고, scaling factor는 수력발전소의 특성변수인 수주(water column)시동 시정수와 기계 시동 시정수로 부터 계산되며, 제안된 이 동조법은 기존의 PI 제어기 동조법의 개념을 PI 형 퍼지 제어기에 적용한 것으로 기존의 논문[2]-[4]에서 제안한 퍼지 제어기의 동조법과 달리 반복적인 학습이 필요없는 새로운 동조법이다. 제안된 자동 동조 퍼지 제어기는 실제의 수력 발전 모델 플랜트의 상태방정식을 이용하여 시뮬레이션하였으며, 기존의 수력 발전소 조속기 제어 결과와 비교 평가함으로써 본 제어기의 우수성을 입증시켜 하였다.

### 2. 자동 동조 퍼지 제어기 설계

수력 발전소의 출력 주파수 제어의 성능 개선을 위해 제어 컴퓨터를 이용한 자동 동조 퍼지 제어기의 구조는 그림 1에서 보여준 바와 같이 퍼지 PI 제어부와 scaling factor 계산부의 2가지 기능으로 구성되어 있다.

### 2.1 퍼지 PI 제어

본 논문에서 제안한 제어기의 주제어부는 기존의 PI 형 퍼지 제어를 사용하였다. PI 형 퍼지 제어기는 간단한 구조로 되어 있고, 퍼지 제어기의 장점을 그대로 가지고 있기 때문이다. 본 논문에서 퍼지 제어기의 입력변수로서 오차  $e(n)$ 와 오차의 변화량  $de(n)$ 을 사용하며, 다음과 같이 정의된다.

$$e(n) = r(n) - y(n), \quad de(n) = e(n) - e(n-1) \quad (1)$$

여기에서,  $n$ 은 샘플링수,  $r(n)$ 은  $n$ 번째 기준입력,  $y(n)$ 은  $n$ 번째 플랜트 출력이다. 측정된 입력 변수들은 퍼지화 과정에서 오차와 오차의 변화량에 입력 scaling factor  $K_1, K_2$ 를 곱함으로써 scale mapping되어 언어적 변수 E와 DE로 변환되며, -3과 3사이의 연속적인 전체 집합(universe of discourse)내로 그림 2와 같이 소속함수를 할당하였다.

$$E = K_1 e(n), \quad DE = K_2 de(n) \quad (2)$$

규칙베이스는 플랜트에 대한 전문가의 지식과 경험을 바탕으로 언어적인 제어규칙을 설계하여 구성한다. 본 논문에서 퍼지 제어기의 범용성을 고려하여 설계한 제어규칙은 표 1과 같다. 퍼지 추론은 Mamdani의 최소연산규칙(Minimum Operation Rule)을 이용하였으며, crisp한 제어기 출력을 얻기 위한 비퍼지화 방법으로는 퍼지 제어에서 가장 많이 쓰이고 있는 무게 중심법(COG : center of gravity method)을 이용하였다. 표 1

의 제어규칙으로부터 퍼지 제어기 출력 DU를 얻을 수 있다. 퍼지 제어기의 출력 퍼지 변수 DU는 scaling factor  $K_3$ 를 곱하므로써 비퍼지 제어기 출력  $du(n)$ 으로 된다.

$$du(n) = K_3 DU \quad (3)$$

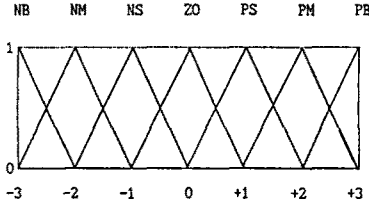


그림 2 소속 함수

표 1 퍼지 제어 규칙

DE	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	
NM	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	
NS	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	
ZO	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	

## 2.2 Scaling Factor 계산

식(1), (2), (3)으로부터 퍼지 제어기의 입출력 변수의 관계는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$K_3 du(n) = F[K_1 e(n), K_2 de(n)] \quad (4)$$

여기에서, F는 퍼지 제어 규칙과 퍼지 추론을 나타낸다. 수력 발전소 출력 주파수 제어의 성능개선을 위한 퍼지 제어기의 최적의 입출력 scaling factor  $K_1, K_2, K_3$ 의 값을 구하기 위하여 먼저 탄성복원 조속기에 대한 선행 연구결과를 이용한다. Paynter, Hovey, Schlieff[1]에 의해  $K_p, K_i$  값은 각각 다음과 같이 계산된다.

$$K_p = C_1 T_m / T_w, \quad K_i = T_w / T_m^2 / C_2 \quad (5)$$

여기에서  $C_1, C_2$ 는 Paynter, Hovey, Schlieff에 따라 각각 다르게 주어지는 상수값이다. 식(5)는  $K_d = 0$ 인 PI 조속기로서  $T_m$ 과  $T_w$ 가 중요한 특성변수이다. 식(5)를 정리하면 다음과 같은 식이 된다.

$$(K_i, K_p) = (T_w / T_m^2 / C_2, C_1 * T_m / T_w) \\ = 1 / C_2 T_w / T_m^2 (1, C_1 * C_2 * T_w) \quad (6)$$

식(6)으로부터 퍼지 제어기의 동조 방정식을 구하면 식(7)과 같다.

$$K_1 = 1(\text{constant}) \\ K_2 = C_1 * C_2 * T_w = k_2 * T_w \quad (7) \\ K_3 = 1 / C_2 * T_w / T_m^2 = k_3 * T_w / T_m^2$$

## 3. 시뮬레이션 및 고찰

본 논문에서 제안한 자동 동조 퍼지 제어기의 성능과 비교하기 위해 기존의 PI 제어계로 구성된 수력 발전시스템을 전달함수 형태로 나타낸 것이 그림 3이다.

PI 제어 계수  $K_p, K_i$ 는 조속기의 최적값으로 알려진 식(6)을 사용하였다. 그림 3에서 제어기를 제외한 수력 발전시스템의 특성을 나타 내는 상태 공간 방정식(state space equation)은 다음 식으로 주어진다.

$$\dot{X} = A X + B U \quad (8)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{D}{T_m} & \frac{1}{T_m} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{GT_w} & \frac{2A}{GT_w} + \frac{2A}{\tau_s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\tau_s} & 0 \\ \frac{K_t}{\tau_t} & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_s} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{m} & 0 \\ 0 & \frac{-2AK_s}{\tau_s} \\ 0 & \frac{K_s}{\tau_s} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad U = \begin{bmatrix} \Delta f \\ U \end{bmatrix}$$

그림 3에 보인 수력 발전시스템의 주파수를 정격치로 정지 제어하기 위해 PI 제어와 퍼지 제어로 시뮬레이션한 결과를 그림 4와 5에 나타내었다. 시뮬레이션을 위한 시스템의 상수는 표 2와 같다. 시뮬레이션은 정격 상태에서 외란으로 부하가 0.05 P.U. 변했을 때의 상태를 나타낸 것이다. 계산의 편이를 위해 제어기의 내부 궤환회로를 나타내는 강성궤환계수  $\sigma$ 는 0으로 하였다. 그림 4는 PI 제어 계수로 최적화한 Paynter의 값을 적용하여 제어한 결과이며, 그림 5는 자동 동조 퍼지 제어기의 적용 결과로 계수  $k_2$ 와  $k_3$ 의 값은 시뮬레이션에 의해 기존 PI 제어기에서 직접 유도된 값보다 성능이 우수한 4와 3/8으로 정하였다. PI 제어의 경우 초기 상태에서 오버슈트가 퍼지 제어시보다 크며 기준입력 5%내의 정상 상태에 이르기까지 약 5초가 걸리지만, 자동 동조 퍼지 제어기의 경우는 오버슈트가 줄어들었으며 정상 상태에 이르기까지 약 2.5초가 걸려 양호한 특성을 보여 주고 있음을 알 수 있다.

표 2 시뮬레이션 상수

기호	$T_w$	$T_m$	D	A	$K_s$	$\tau_s$	$K_t$	$\tau_t$	G
값	0.36	9.4	1.6	0.89	0.11	0.08	1	0.06	60%

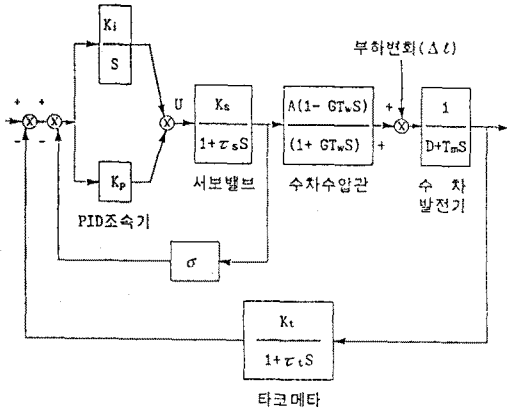


그림 3 수력 발전소 제어 시스템의 구성도

[기호 설명]

- $T_w$  : 수주(water column) 시동 시정수(sec)
- $T_m$  : 회전자 시동 시정수(sec)
- D : 발전기 회전자 복원 상수
- A : 수문 개도에 대한 토크 변이값
- $K_t, K_s$  : 타코미터, 서보밸브 게인
- G : 수차 안내깃 개도(x)
- $\tau_t, \tau_s$  : 타코미터, 서보밸브 시정수(sec)
- $\sigma$  : 감성계환계수
- $K_p, K_i$  : PI 제어기의 비례, 적분상수

#### 4. 결 론

본 논문에서는 종래의 수력발전소에서 출력 주파수 제어를 위해 많이 사용되던 기계식 탄성복원 조속기에 대한 성능개선을 목적으로 자동 동조 퍼지 제어를 설계하였으며 실제 수력 발전시스템에서 성능을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) PI 제어기에 비하여 좋은 초기 상태 특성과 빠른 정정 시간 특성을 보여 주고 있어 종래의 PI 제어 방식의 대체 효과를 얻을 수 있다.
- (2) 제안된 자동 동조 퍼지 제어기의 장점은 제어기 설계자가 직접 퍼지제어기의 소속함수나 scaling factor를 구하여야 하는 번거로움이 없고 오차에 대한 scaling factor의 함수를 시스템 설계 변수를 이용하여 자동 동조하는 것이므로 수력발전소의 범용 제어시스템으로 응용이 가능하다. 그러나, 퍼지 제어기의 제어 성능을 좀 더 개선시키기 위

해서는 퍼지 제어 규칙의 후진부의 값을 자동으로 생성하는 제어 규칙의 동조법에 대한 개발이 연구되어야 할 것이다.

[참고문헌]

1. 신동열, 박완순, 이원용, "한국형 소수력 발전시스템 개발", 한국동력자원연구소, 연구보고서 KE-86-5, 1986.
2. T. J. Procky, E. H. Mamdani, "A Linguistic Self Organizing Process Controller", Automatica Vol.15, pp.15-30, 1979.
3. M. Sugeno, "Self-Organizing Fuzzy Controller", Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.20, No.9, pp.720-726, 1984.
4. M. Maeda, et al., "A Design of Self-Tuning Fuzzy Controller", Proc. of 5th Fuzzy System Symp., pp.151-156, Kobe, Japan, June 1989.
5. 이선근, 권오석, 이원용, 신동열, "자동 동조 퍼지 제어를 이용한 조속기 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.265-268, 1992.
6. 이선근, "자동 동조 퍼지 제어기 설계 및 시뮬레이션", 충남대학교, 석사학위논문, 1992.

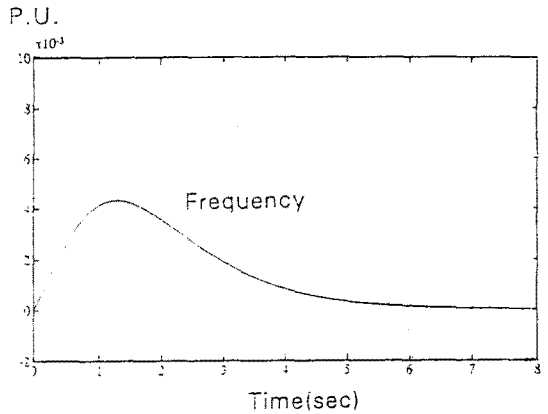


그림 4 PI 제어 결과( $\sigma = 0$ )

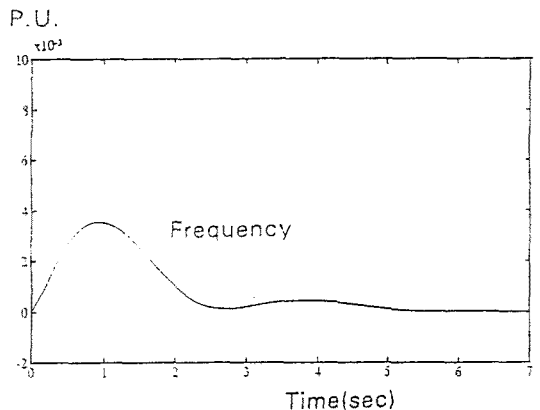


그림 5 자동 동조 퍼지 제어 결과( $\sigma = 0$ )