

자동 동조 퍼지 제어를 이용한 수력 발전소 조속기 연구

이 선근^o 이 원용 신 동열
한국에너지기술연구소

권 오 석*
*충남대학교 전자계산기공학과

A Study on the Hydraulic Turbine Governor using Automatic Tuning Fuzzy Controller

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

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

Abstract- The control performances of a fuzzy controller depend on its control rules, I/O membership functions, and scaling factors. Scaling factors are very important to adjust control parameters to the process which is to be controlled. For tuning the scaling factors, trial and error method is used in conventional fuzzy controller, which is very difficult and time consuming. This paper proposes a tuning method of scaling factors based on the concept of tuning rules for the conventional PI controller parameters. The proposed automatic tuning fuzzy controller was evaluated by computer simulations. Good results have been obtained for the small hydro power plant.

1. 서 론

소수력 발전소에서 발전되는 출력(전압, 주파수)을 안정되게 연기 위해서는 부하변동 등에 기인하는 수차 발전기의 출력상태를 제어하기 위한 조속기(governor)가 필요하다. 지금까지 탄성복원 조속기(temporary droop governor)[1]를 많이 사용하여 왔으며, 이것은 일종의 PI제어기로 기계유압식 조속기이므로 간단하고 내구성은 양호하나, 안정성과 민감도가 떨어지는 단점이 있다.[2]

본 논문은 조속기의 성능을 향상시키기 위해 컴퓨터를 이용한 자동 동조 퍼지 제어기에 대한 연구 결과이다. 퍼지 제어의 성능은 제어 규칙, 소속 함수의 형태, scaling factor 등의 제어 파라미터에 의해서 결정된다.[3]-[5] 그러므로 이러한 제어 파라미터들을 동조시키는 방법을 찾는 것은 퍼지 제어를 실제 플랜트에 적용하기 위해서는 필수적인 과정이다. 기존의 논문[6]-[9]에서 제안한 퍼지 제어의 파라미터 동조는 실제 플랜트 혹은 그 시뮬레이터를 이용한 제어 실험을 통하여 얻어진 응답 특성 등의 제어 결과로부터 지속적인 시행착오를 통하여 최적화하는 방법이 일반적이다. 이 방법들은 주로 반복적인 학습을 전제로 하고 있으므로 시뮬레이터를 이용한 지식획득이나 파라미터 조정은 유효하지만, 실제 플랜트 공정 중에 반복적인 학습을 시행하기에는 적용이 어렵다.

본 연구에서는 PI형 퍼지 제어를 대상으로, 수력발전소 조속기 성능개선을 고려한 퍼지 제어기의 설계 이론과 반복적인 학습이 필요없는 scaling factor의 동조법에 기초한 자동 동조

퍼지 제어를 제안하였다. Scaling factor를 이용한 동조법은 제어 대상을 간단한 모델로 근사시킨 모델 파라미터와 scaling factor의 관계를 도출하여 자동으로 입출력 제어 파라미터를 동조하는 방법으로, 기존의 PI제어기 파라미터 동조법[10][11]의 개념을 PI형 퍼지 제어기에 적용한 것이다. 제안된 자동 동조 퍼지 제어기는 실제의 수력 발전 모델 플랜트의 상태방정식을 이용하여 시뮬레이션하였으며, 기존의 수력 발전소 조속기 제어 결과와 비교 평가하므로써 본 제어기의 우수성을 입증코져 하였다.

2. 자동 동조 퍼지 제어기 설계

수력 발전소 조속기의 성능개선을 위해 컴퓨터를 이용한 자동 동조 퍼지 제어기의 구조는 그림 1에서 보여 준 바와 같이 퍼지 PI 제어부와 scaling factor계산부의 2가지 기능으로 구성되어 있다.

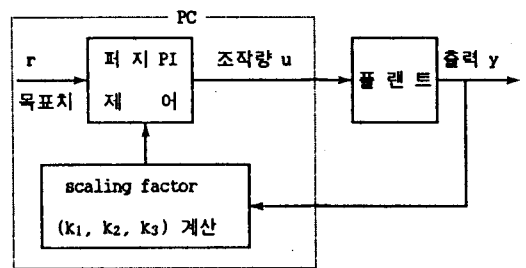


그림 1 자동 동조 퍼지 제어기의 구조

2.1 퍼지 PI 제어

본 논문에서는 퍼지 PI 제어를 대상으로 연구하였다. 퍼지 PI 제어기는 간단한 구조로 되어 있고, 퍼지 제어기의 장점을 그대로 가지고 있기 때문이다. 퍼지 제어기는 일반적으로 주어진 목표치와 프로세스 출력을 비교하여 제어한다. 예를 들면,

"IF E is PB_E and DE is ZO_{DE} THEN DU is PB_{DU} "

여기에서, PB_E 는 오차 E, ZO_{DE} 는 오차 변화 DE, 그리고 PB_{DU} 는

조작량 DU와 관련된 각각의 퍼지 부분 집합이다. E와 DE는 실제 프로세스 오차 $e(n\tau)$ 와 오차 변화 $de(n\tau)$ 으로 나타낼 수 있다. 오차는 목표치와 조작량 $u(n\tau)$ 의 차를, 오차 변화는 조작량의 상승(또는 하강)의 속도를 나타낸다. 이 두가지를 측정 하므로써 프로세스의 조작량(제어량)상태를 알 수 있다. 이 제어량의 상태를 근거로 퍼지 추론 엔진은 프로세스가 진행되는 동안 시간 상수가 큰 쪽으로 변화하더라도, 시간 스케일을 초기 모델의 제어 파라미터 상태로 유지할 수 있도록 자동 동조할 수 있다. 제어기의 입력 퍼지 변수 E, DE는 다음과 같이 설정한다.

$$E = k_1 e(n\tau) \quad (1)$$

$$DE = k_2 de(n\tau) \quad (2)$$

여기에서 k_1, k_2 는 scaling factor이고, τ 는 샘플링사이며, 그리고 n 은 샘플링 수이다. 측정된 입력 변수는 오차 $e(n\tau)$ 와 오차의 변화량 $de(n\tau)$ 에 scaling factor k_1, k_2 를 곱함으로써 전체집합의 적당한 양자화 레벨로 크기 변환되고, 표 1의 제어 규칙으로부터 제어기 출력 DU를 얻을 수 있다. 제어기 출력 퍼지 변수 DU는 scaling factor k_3 을 곱하므로써 비퍼지 제어기 출력 $du(n\tau)$ 로 된다.

$$du(n\tau) = k_3 DU \quad (3)$$

표 1 제어 규칙

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

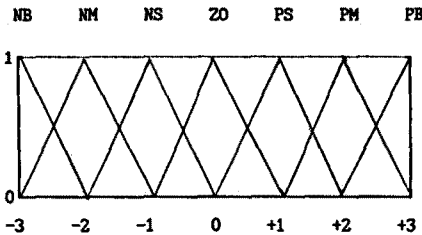


그림 2 소속 함수

퍼지 제어기의 퍼지 추론은 Mamdani의 최소연산규칙(Minimum Operation Rule)[12]을 이용하였으며, 비퍼지화 방법으로는 퍼지 제어에서 가장 많이 쓰이고 있는 무게중심법(COG : center of gravity method)을 이용하였다.

2.2 Scaling Factor 계산

Scaling factor의 동조는 Ziegler-Nichols의 동조 규칙[13]에 기초를 두고 있다. Scaling factors는 식(4)에서 보는 바와

$$G(S) = \frac{K}{1 + TS} e^{-LS} \quad (4)$$

같이 근사적 모델 파라미터와 목표치 최대 변화폭 R_{MAX} 로부터 계산하여 얻어진다.

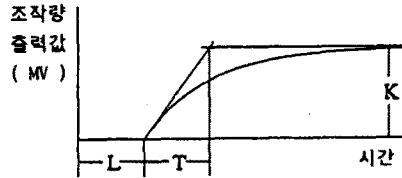


그림 3 Scaling factor계산을 위한 모델 파라미터

퍼지 제어기의 출력(조작량 제어)은 식(5)와 같이 선정한다.

$$u = \frac{k_3}{s} F(k_1 E, k_2 s E) \quad (5)$$

여기에서 $F(X1, X2)$ 는 퍼지 추론을 나타내는 비선형 함수이다. 기존의 Ziegler-Nichols의 방법을 이용하여 퍼지 제어기의 동조 방정식을 구하면 식(6)과 같다.

$$k_1 = \frac{1}{R_{MAX}}$$

$$k_2 = \frac{3.3 * L}{R_{MAX}} \quad (6)$$

$$k_3 = \frac{0.27 * R_{MAX} * T}{K * L^2}$$

3. 시뮬레이션 및 그찰

본 논문의 퍼지 제어기의 성능과 비교하기 위해 기존의 PI 제어계로 구성된 수력 발전 시스템을 전달함수 형태로 나타낸 것이 그림 4이다.[14]

PI 제어 계수 K_p, K_i 는 조속기의 최적값으로 알려진 다음 식을 사용하였다.[15]

$$K_p = 0.4 T_m / T_w$$

$$K_i = 1 / 14.75 T_m / T_w^2$$

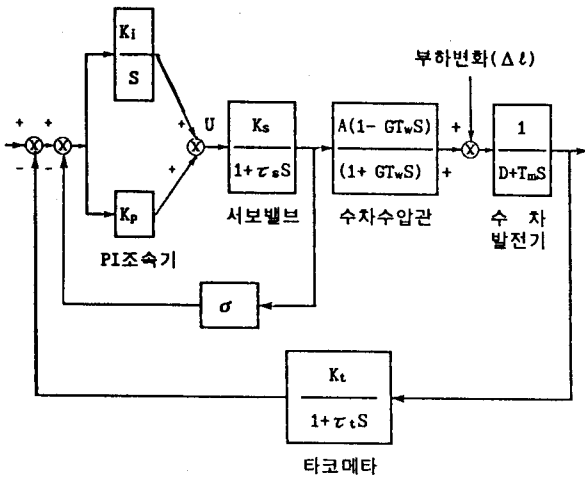


그림 4 수력 발전 제어 시스템의 블록도

[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 편미분값
- K_t, K_s : 타코메타, 서보밸브 게인
- G : 수차 안내깃 개도(x)
- τ_t, τ_s : 타코메타, 서보밸브 시정수(sec)
- σ : 강성궤환계수
- K_p, K_i : PI 제어기의 비례, 적분상수

그림 4에서 제어기를 제외한 수력 발전 시스템의 특성을 나타내는 상태공간방정식(state space equation)은 다음 식으로 주어진다.

$$\dot{X} = A X + B U$$

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

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma} & 0 \\ 0 & \frac{-2AK_s}{\tau_s} \\ 0 & \frac{K_s}{\tau_s} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U = \begin{bmatrix} \Delta l \\ U \end{bmatrix}$$

그림 4에 보인 수력 발전 시스템의 주파수를 정격치로 정치 제어하기 위해 PI 제어와 퍼지 제어로 시뮬레이션한 결과를 그림 5와 6에 나타내었다. 시뮬레이션을 위한 시스템의 상수는 표 2와 같다. 시뮬레이션은 정격 상태에서 외란으로 부하가 0.05 P.U. 변했을 때의 상태를 나타낸 것이다.

표 2 시뮬레이션 상수

기호	T _w	T _m	D	A	K _s	τ _s	K _t	τ _t	G
값	0.36	9.4	1.6	0.89	1.0	0.08	1.0	0.06	60%

계산의 편이를 위해 제어기의 내부궤환회로를 나타내는 강성 궤환계수 σ는 0으로 하였다. 그림 5는 PI 제어 계수로 최적화한 값을 적용하여 제어한 결과로써, 부하변화에 따른 주파수의 변화 폭은 별 차이가 없었으나, 퍼지 제어의 경우(그림 6) 정정시간이 PI 제어의 50% 정도로 줄어든 것을 알 수 있다.

이것은 그림 5와 6에서 보는 바와 같이 외부에서 부하변화가 있을 경우, 퍼지 제어가 수차의 수문(gate)을 제어하는 성능이 PI제어보다 우수하기 때문이다.

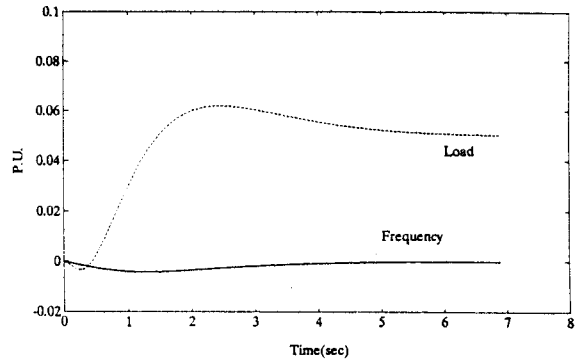


그림 5 PI 제어 결과(σ = 0)

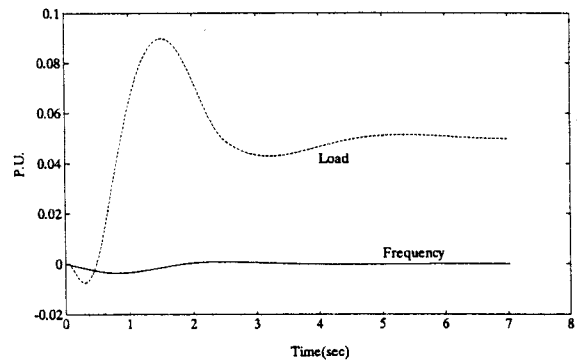


그림 6 퍼지 제어 결과(σ = 0)

5. 결 론

퍼지 제어기의 제어 성능에 영향을 주는 제어 파라미터, 즉 제어 규칙, 입력력 소속 함수의 형태, 그리고 scaling factor 를 결정하기 위해 기존 논문에서는 제어 응답을 이용한 시행착 오법과 반복적인 학습기능에 의한 파라미터 결정방법을 사용하였으나, 본 논문에서는 PI형 퍼지 제어기를 대상으로 실용성을 고려하고 반복적인 시행착오와 학습이 필요없는 자동 동조 퍼지 제어기의 이론 설계와 scaling factor의 동조법을 제안하였다. Scaling factor의 동조법은 제어 대상을 간단한 모델로 근사시킨 근사적 모델 파라미터와 퍼지 제어기의 입력 변수인 실제 오차와 그 오차변화를 정규화된 양으로 변화시키는 scaling factor와 정규화된 값을 실제 출력변수로 바꾸어 주는 scaling factor의 관계를 도출하여 동조하는 방법으로, 기존의 PI 제어기의 파라미터 동조 규칙의 개념에 기반을 둔 것이다.

제안된 자동 동조 퍼지 제어기의 성능 확인을 위하여 실제의 수력 발전 모델 플랜트의 상태방정식을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과 퍼지 제어기의 정적 주파수 정정시간은 PI제어의 50%정도로 나타나 본 제어기의 우수성이 입증되었다.

참 고 문 헌

1. Hovey, L. M., "Optimum Adjustment of Governors", The Engineering Jour., pp.64-71, Nov. 1960.
2. Frick, P. A., "Automatic Control of Small Hydroelectric Plant", IEEE Trans. Power Apparatus & system, Vol. PAS-100, No.5, pp.2476-2485, 1981.
3. Pedrycz, M., "Fuzzy Control and Fuzzy Systems", John Wiley & Sons, 1989.
4. Sugeno, M., "An Introduction Survey of Fuzzy Control", Information Science, Vol.36, pp.59-83, 1985.
5. Kawaji, S., "Design of Fuzzy Control System based on PD Control Scheme", IFSA Conf. in Engineering, Brussels, 1991.
6. Procky, T. J., Mamdani, E. H., "A Linguistic Self Organizing Process Controller", Automatica, Vol.15, pp.15-30, 1979.
7. Sugeno, M., "Self-Organizing Fuzzy Controller", Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.20, No.9, pp.720-726, 1984.
8. Maeda, M., et al., "A Design of Self-Tuning Fuzzy Controller", Proc. of 5th Fuzzy System Symp., pp.151-156, Kobe, Japan, June 1989.
9. Hayashi, I., et al., "Learning Control of Inverted Pendulum System using Artificial Neural Network Driven Fuzzy Reasoning", Proc. of 5th Fuzzy System Symp., pp.183-187, Kobe, Japan, June 1989.
10. Smith, C. A., Corripio, A. B., Automatic Process Control, John Wiley & Sons, Inc., 1985.
11. Hayashi, S., "A Tuning Method of Fuzzy Control System", Proc. of 6th Fuzzy System Symp., pp.189-193, Tokyo, Japan, Sept. 1990.
12. Mamdani, E. H., "Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant", IEEE Proc. Control & Science, Vol.121, No.12, pp.1585-1588, Dec. 1974.
13. Ziegler, J. C., Nichols, N. B., "Optimum Settings for Automatic Controller", Trans. ASME, Vol.65, pp.433-444, 1943.
14. 신 동열, 이 원용, "수력 발전소 PID 조속기의 안정성 해석 연구", 에너지 R & D, Vol.12, No.1, 1990
15. 신 동열, 이 원용, "마이크로 컴퓨터를 이용한 소수력 발전소 PID 조속기에 관한 연구", 전기학회지, Vol.36, No.7, pp.492-500, 1987.