

수차 속도제어기의 PID 동조를 위한 퍼지 알고리즘에 관한 연구

김 영 규 배 두 현 조 남 빈 신 강옥*
한국수자원공사 수자원연구소

A Study on Fuzzy Algorithm for PID Tuning of Turbine Speed Controller

Y.G.Kim, D.H.Paik, N.B.Cho, G.W.Shin
KOWACO Water Resource Research Institute

Abstract-In this study, the algorithm of optimal parameter inference is proposed. At this inferring method, we tried to acquire the follow-up to reference pattern through comparing the plant output pattern with random reference pattern. As an inference method, the fuzzy theory was applied and the proposed algorithm was proved by computer simulation.

1. 서론

현대 산업제어 공정에서 운용되고 있는 많은 제어 알고리즘이 있지만 가장 잘 알려져 있고 폭넓게 사용되고 있는 제어기는 PID 제어기이다. 많은 제어기들 중에서 PID 제어기가 지금까지 다양한 산업공정에 적용되고 있는 것은 폭넓은 동작범위에서 단순한 구조를 갖고 있으며, 간단한 동작 특성을 나타내고 있기 때문이다. 그러나 이러한 간단한 특성을 갖고 있음에도 종종 이들이 잘못 결정되어 있어 잠재적인 PID 제어기의 능력을 충분히 발휘하지 못하는 경우가 혼하다. 지금까지 제어 대상의 특성변화에 대응되는 제어기의 최적 파라메타 설정을 위하여 많은 시간과 노력을 통하여 여러가지 방법들이 제시되었다.[1] 지금까지 제안된 PID 제어기의 제제적인 동조방법은 Ziegler-Nichols방법과 Chien-Hrones에 의해 제안된 방법이 대표되고 있다. Ziegler-Nichols의 동조방법은 시스템의 안정도 한계에서의 최대 이득과 최대 진동 주기를 구해야 한다. 그러나 실제 플랜트에서의 이 방법은 진동 동작이 회피되어야 한다는 것과 플랜트의 정확한 값을 실험적으로 구하기가 어려운 단점을 가지고 있다. 그리고 Chien-Hrones에 의해 제안된 방법은 플랜트의 정확한 진달함수 형태를 요구한다. 그러나 실제 플랜트의 대부분은 전달함수 형태로 표현하기 어려운 것이 대부분이다. 또한, 실제적인 플랜트에서의 동조방법은 숙련된 기술자에 의한 시행착오법을 이용한 동조방법을 사용하여 많은 시간을 소비하고 있으며, 공정의 조건이나 프로세스의 동특성이 변하는 시스템은 수시로 계수를 조정하여야 하는 문제점을 앓고 있다.[2][3]

본 연구에서는 기존의 동조방법인 시행착오법이나 임의의 규칙에 따른 동조방법에서 벗어나 퍼지 이론을 도입하여 수력발전소의 특성에 적합한 동조방법을 제시하였다. 본 연구에서의 제어기 입력변수 설정방법은 수력발전소의 특성상 준공시 제시된 플랜트 응답특성을 기준폐면으로 설정하여 응답특성이 안정되는 임의의 주기를 설정하여 현재의 플랜트 응답특성과 상호 비교하도록 하였다. 또한 퍼지 추론을 위한 퍼지 입력변수 설정은 극좌표법에 의한 두 폐면 각각에 대한 피크시간 편차와 피크값 편차를 이용하였다. 또한 제어기 파라메타의 소속 함수가 제어대상에 따라 가변성을 갖도록 구성하여 수력발전소 수차제어기에 대한 범용성을 고려하였다.

본 논문에서의 구성은 2장에서는 충주 제1수력 발전소의 수차제어기에 대한 모델링을 하였으며, 3장에서는 수력발전소에 적합한 PID동조 알고리즘을 제시하였고, 4장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 본 논문에서 제시된 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

2. 수력발전소 제어시스템

수력발전소의 구성은 속도제어기와 수차발전기를 직접 제어하기 위한 제어신호를 기계적인 조작신호로 변환시키는 액류 에이터부, 에너지의 원천인 물의 진행을 도와주는 수로, 발전기의 제어신호인 수차의 속도를 검출하는 속도검출부, 그리고 수차발전기로 구성되어 있다.

본 연구에서 모델링한 대상 플랜트는 충주 제1수력 발전소로서 이 발전소의 수차 제어계의 구성은 속도 검출회로, ΔF 와 불감대(Dead Band)회로, PID 제어회로, 속도 수하을 설정회로, 파워 앤프회로, 위치검출회로 등으로 구성되어 있다.[4]

수력 발전소의 전체 블럭도는 그림 1과 같이 간략화 시킬수 있다

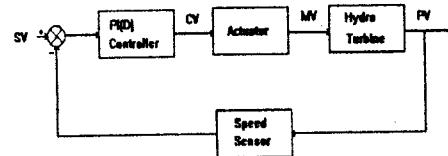


그림 1 수차제어계의 블럭도

발전소 전체 전달함수는식 (1)과 같다.

$$G_T(s) = \frac{G_{ct}(s) G_{av}(s) G_{wm}(s)}{1 + K_0 G_{ct}(s) G_{av}(s) G_{wm}(s)} \quad (1)$$

여기서, PID 제어부의 전달함수 $G_{ct}(s)$ 는

$$G_{ct}(s) = \frac{(K_b T_i T_d + K_d T_i T_d)s^2 + (K_b T_i + T_d)s + 1}{T_i T_d s^2 + T_d s} \quad (2)$$

또한, 액류에이터부의 전달함수 $G_{av}(s)$ 와 수로 및 수차발전기의 전달함수 $G_{wm}(s)$ 는 각각 다음과 같이 표현 가능하다.

$$G_{av}(s) = \frac{K_2 G_a(s)}{1 + K_2 K_3 G_a(s)} \quad (3)$$

여기서

$$G_a(s) = \left(\frac{K_5}{M s^2 + C s + K_7} \right) \left(\frac{1}{1 + K_1 s} \right) \left(\frac{1}{T_s s + K_6} \right) \left(\frac{K_8}{T_c s} \right) \quad (4)$$

$$G_{wm}(s) = \left(\frac{1 - T_w s}{1 + 0.5 T_w s} \right) \left(\frac{1}{T_m s} \right) \quad (5)$$

3. PID 동조 알고리즘

현재 운영되고 있는 수공의 수력발전소 제어기 대부분은 아날로그이며 본 연구에서는 현재의 제어기 형식에 적합한 적정 파라메타 설정을 위한 PID동조 알고리즘 개발을 목적으로 연구되었다. 따라서 아래 구성도에서의 제어기 파라메타 추론에 따른 PID변수 조정은 오프라인으로 진행된다.

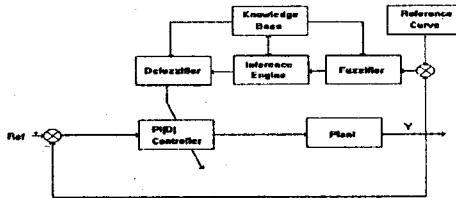


그림 2 PID 동조 구성도

PID 동조를 위한 제어 변수 추론과정은 그림3과 같다. 먼저, 각 플랜트의 제어기 사양을 입력받는데 일반적으로 수력발전소의 속도제어기는 PID제어기와 PI제어기로 구성되어 있어 이 두종류의 선택사항이라 할 수 있다. 또한 각 플랜트의 제어파라메타 각각에 대한 범위를 입력한다. 이 범위는 파라메타 추론시 0과 1사이의 값으로 일반화하여 파라메타 변수 추종능력을 향상할 수 있다. 제어기 사양을 입력받은 후 발전소 준공 시 제시된 플랜트 출력값이나 시험에서 수집된 출력을 임의로 선정하여 기준 패턴으로 설정한다. 이 기준패턴 설정은 각 발전소 특성 시험에 의한 응답곡선이 안정화되는 시점까지의 주기를 기준패턴으로 설정한다.

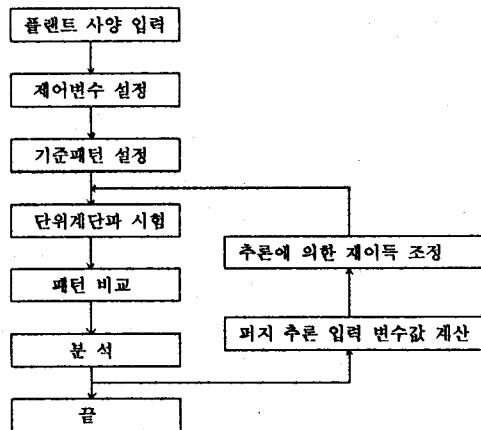


그림 3 동조 시험 흐름도

페턴분류 방식은 설정된 한 주기의 기준패턴과 플랜트의 출력패턴을 비교하여 두개의 응답곡선에 대한 각도와 피크값을 계산하여 극좌표로 변환한다.

추론을 위한 입력변수는 기준패턴과 출력곡선의 편차에 의해 다음식과 같이 R 과 θ 로 표현된다.

$$R = \sqrt{dP^2 + dI^2} \quad (6)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{dI}{R} \quad (7)$$

여기서, $dP = P_1 - P_2$, $dI = T_1 - T_2$ 이고 P_1 과 T_1 은 각각 기준패턴의 피크값과 피크시간이며, P_2 와 T_2 는 각각 플랜트 출력패턴의 피크값과 피크시간이다.

현재 각 수력발전소 조속기의 파라메타 변수는 제작준공시 안정한 시스템을 유지하도록 일정한 범위로 설정되어 있으며 리미트회로를 포함하고 있다. 이러한 시스템의 특성에 맞게 일정범위를 기준으로 조속기 파라메타를 다음과 같이 0과 1사이의 값으로 정규화할 수 있다.

$$K_p = (K_p - K_{p,\min}) / (K_{p,\max} - K_{p,\min}) \quad (8a)$$

$$K_d = (K_d - K_{d,\min}) / (K_{d,\max} - K_{d,\min}) \quad (8b)$$

$$T_i = (T_i - T_{i,\min}) / (T_{i,\max} - T_{i,\min}) \quad (8c)$$

조속기 파라메타 K_p , K_d , T_i 는 다음과 같은 퍼지 규칙 집합으로 결정된다.

$$\begin{aligned} &\text{If } R \text{ is } A_i \text{ and } \theta \text{ is } B_i, \\ &\text{then } K_p \text{ is } C_i, \quad K_d \text{ is } D_i, \quad T_i \text{ is } E_i \quad (9) \\ &i = 1, 2, \dots, m. \end{aligned}$$

여기서, C_i , D_i , 그리고 E_i 는 각 파라메타에 대응되는 퍼지집합이다. 입력변수 R , θ 의 퍼지집합에 대한 소속함수는 선형 이동변삼각형으로 설정하였다. 또한, 출력변수 K_p , K_d , T_i 에 대한 맴버쉽 함수는 그림 4와 같이 나타나 있으며, 각 소속함수의 대역 폭은 기준 파형의 파라메타 값을 기준으로 설정하였다.

이러한 기준패턴을 이용한 파라메타 추론방식에 있어서의 소속함수를 기준패턴에 따라 다르게 정의함으로서 타 발전소에 설치된 조속기의 파라메타에도 쉽게 적용 가능하도록 구성하였다.

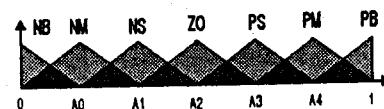


그림 4 출력 파라메타의 소속함수

여기서, A2는 출력패턴의 조속기 파라메타값을 기준으로 하여 설정하였으며, 각 소속함수의 범위는 기본적으로 일정한 간격을 유지하도록 그림 5와 같이 구성하였다. 예를 들어 기준 값이 0.3일 때 각 소속함수의 폭은 일정하게 만들고 나머지 부분은 positive big 부분에 포함시킴으로써 제어 변수 추론에 있어서의 극한적인 에러를 방지함과 함께 각 변수의 좌우한계 범위에 대한 미세조정이 가능하도록 하였다.

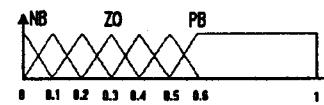


그림 5 기준값에 따른 소속함수

퍼지 추론을 위한 합성규칙은 Zadeh에 의해 제안된 Min-Max 방식을 사용하였다. 또한, 추론 결과에 대한 비퍼지화 방법은 무게중심법을 사용하였다.[5]

4. 시뮬레이션

본 연구에서 제시한 퍼지 알고리즘을 검증하기 위하여 플랜트의 상수를 발전기 준공 시험시 제작자가 제시한 값을 기준값으로 설정하였다. 제어기 변수(K_p , K_d , T_i)는 표2와 같은 범위와 기준패턴 설정값을 나타내었다.

표 2 제어기 변수값

K_p : Proportional Gain	0.14 (0 - 0.49)
K_d : Derivative Gain	0.3 (0 - 1)
T_i : Integral Time Constant	600 (40 - 1040)
K_b : Restoring ratio	0.07 (0.05 - 0.25)

위의 상수를 적용한 플랜트 기준패턴의 전달함수식은 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{-11.869s^3 + 6.7367s^2 + 0.7313s + 0.0085}{1.9e^{-6}s^9 + 9.96e^{-4}s^8 + 6.1e^{-2}s^7 + 7.23s^5 + 9.6s^4 + 2.34s^3 + 0.51s^2 + 0.03s + 3.86e^{-4}} \quad (10)$$

위 플랜트의 특성에 적합한 제어기 변수를 추론하기 위하여 다음의 임의 데이터를 적용하여 플랜트 출력특성과 기준폐탄과의 비교를 통하여 본 연구의 알고리즘 검증을 하였다.

사례연구 1 출력폐탄이 기준폐탄보다 뒤진 경우

기준폐탄의 파라메타:

$$K_f = 0.14, K_a = 0.3, T_i = 600, K_6 = 0.07$$

출력폐탄의 파라메타:

$$K_f = 0.16, K_a = 0.2, T_i = 800, K_6 = 0.09$$

그림 6에서의 출력폐탄에 대한 퍼지추론을 2회 실시한 결과 그림7과 같이 양호한 응답특성을 갖는 파라메타를 다음과 같이 추론하였다.

$$K_f = 0.159, K_a = 0.405, T_i = 955, K_6 = 0.09$$

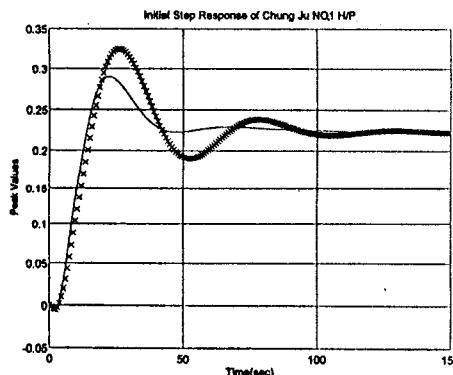


그림 6 출력폐탄이 뒤진 경우

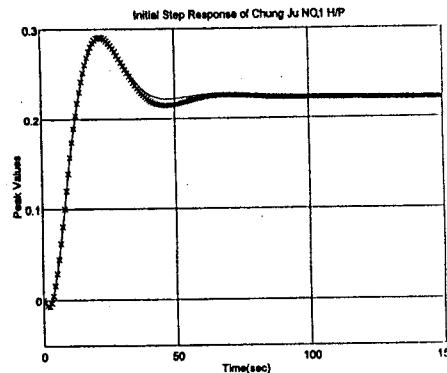


그림 7 퍼지추론에 의한 출력

사례연구 2 출력폐탄이 기준폐탄보다 앞선 경우

기준폐탄의 파라메타:

$$K_f = 0.14, K_a = 0.3, T_i = 600, K_6 = 0.07$$

출력폐탄의 파라메타:

$$K_f = 0.18, K_a = 0.4, T_i = 400, K_6 = 0.06$$

그림 8에서의 출력폐탄에 대한 퍼지추론을 3회 실시한 결과 그림9와 같이 양호한 응답특성을 갖는 파라메타를 다음과 같이 추론하였다.

$$K_f = 0.144, K_a = 0.287, T_i = 482, K_6 = 0.06$$

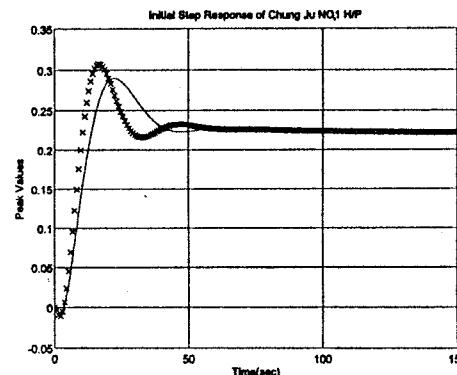


그림 8 출력폐탄이 앞선 경우

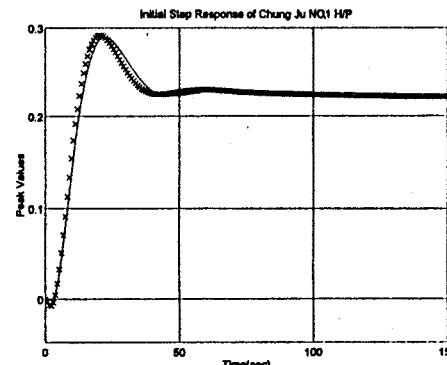


그림 9 퍼지추론에 의한 출력

5. 결론

본 연구에서는 수력발전소 수차제어계의 PID 동조를 위한 퍼지 동조알고리즘을 제시하였다. 또한 대상 시스템의 고차계 및 비선형성이라는 특성에 적합한 퍼지 제어규칙을 구축하였으며, 타 발전소 수차제어기에의 적용이 가능하도록 파라메타를 정규화하여 소수합수의 가변성을 부기하였다.

비선형성을 갖는 시스템의 특성에 적합한 PID 동조알고리를 검증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 타당성을 입증하였다.

향후에는 본 연구에서의 결과를 기초로 하여 소수력발전소의 수차 속도제어기 및 자동전압 조정장치를 디지털 일체형 제어기로 개발하고자 한다.

참고문헌

- Ziegler,J.G. and N.B.Nichols,"Optimum Settings for Automatic Controllers," Transactions of the ASME, Vol.64, pp.759-768 ,1942.
- Q.H.Wu,B.W.Hogg, "Robust self-tuning Regulator for a Synchronous Generator," IEE Proc., pt.D, Vol.135, No.6, pp.463-473, 1988.
- IEEE Committee Report,"Hydraulic Turbine and Control Models for System Dynamic Studies," IEEE, Trans.PS, Vol.7, No.1,pp.167-179,1992.
- 한국수자원공사 최종보고서,"온-라인 PID 자동동조기 개발 연구," 1993.
- R.R.Yager, L.A.Zadeh, "An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems," 1992.