퍼지추론을 이용한 수차 속도제어기 동조기법에 관한 연구

이 정 환 김 운 해 백 두 현 성 기 민° 신 강 욱
한국수자원공사 수자원연구소 제어연구실

J.H.Lee, W.H.Kim, D.H.Paik, K.M.Sung, G.W.Shin

A Study on Tuning Method of Turbine Speed Controller Using Fuzzy Inference

Control Research Lab.
KOWACO Water Resoruces Researh Institute

Abstract

In order to estimation the optimum PID parameter of the turbine speed controller, the response curve of the object plant was compared with the reference pattern and then the magnitude peak value error and peak time error was calculated. With the calculated errors as input into the Fuzzy inference method was introduced to propose the tuning method for each parameter. And the computer simulation was performed with the above Fuzzy inference method in which the Chunju hydro power plant turbine governor system was used as a model. This Study also aims to develop the exclusive tuner for governor using industrial computer.

1. 서론

최근 다른 산업공정에서와 마찬가지로 수력발전 시스템에서도 제어기법과 관련기술의 발전으로 수차의 속도제어를 위한 전기식 조속기(Governor)가 컴퓨터를 근간으로한 디지탈 조속기로 대체되고 있는 추세이나[1]기본적인 제어방법은 셋 포인트(Set Point)추적기능, 외란처리기능, 제어대상의 비선형성, 불확실성에 대해서도 강인한 특성을 갖고 있는 PID제어기법이 다양한 현대제어기법의 개발에도 불구하고 산업공정제어 전반에 걸쳐 사용되고 있다.[2]

그러나 PID제어기는 제어대상의 특성변화에 대응하는 제어기의 파라메터를 결정하는 동조가 필요하며 이러한 동조기법들은 Ziegler-Nichols가 주파수 영역에서의 동조방법을 제시한이후 많은 동조방법들이 발표되었고 크게 개 루프(Open Loop)방법과 폐 루프(Closed Loop)방법으로 구분되며 개 루프방법에는 계단응답이나 펄스응답에 의한 Ziegler-Nichols법, CHR법등과 폐 루프방법으로서 계단응답의 오버슈트 감쇄율을 이용한 기법, T.Kitamori가 제시한 모델매칭법과 구형파나 펄스신호로 플랜트를 여자시킨후 그신호에 대한 플랜트의 임계주기내에서의 임계감도를 이용한 방법등이 주로 이용되고 있다.[3]

본논문에서 제시하는 퍼지추론을 이용한 동조방법은 수력발전소의 수차제어계가 고차계이고 가이드밴 개도를 결정하는 서어보제어용 유압계통과 댐수위의 변화등 비선형적이고 랜덤한 외란, 시스템자체의 특성변화에 따른 플랜트상수의 시변성(Time Varing)등 다양한 변수와 관성이 큰 회전체등을 갖고 있는 복합시스템으로 기존의 동조기법으로는 최적의 파라메터를 결정하기는 어려움이 많다.

따라서 지금까지의 제어기 동조는 운영자의 경험에 의한 시행착오(Trial and error)의 과정과 임의의 규칙으로 시행되어 왔으나 이방법은 수차제어계의 동조방법으로는 적절하지 못하여 퍼지추론 기법을 도입, 제어규칙을 결정하고 이규칙에 따라 기준패턴을 추종, 최적의 파라메터를 운영자에게 제시하는 패턴인식 동조기법을 개발하였고 이기법을 우리공사에서 운영하는 충주제 1수력 발전소를 모델로 컴퓨터 시뮬레이션을 시도한 결과 기준패턴을 양호하게 추종해가는 결과를 얻었다.

2. 수차제어계 모델링

충주수력의 수차제어계의 기본구성은 그림2.1과 같이 속도검출회로(PDT1), ⊿F와 불감대(Dead Band)회로(AKA017), PID제어회로(DEF1, AKA019), 스피드 수하율 설정회로(AKA016), 파워앰프회로(PAP3), 위치검출회로(ADD1)등으로 구성되어 있으며

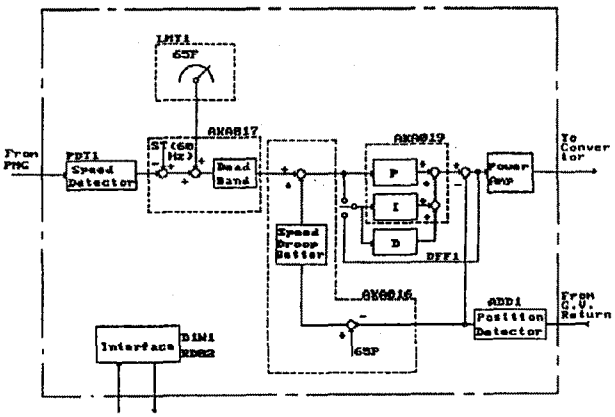


그림 2.1 충주제1수력 PID 조속기 구성도
Fig 2.1 Block Diagram of Chung Ju H/P PID Governor

이 제어기로 부터 제어신호를 받아 수차발전기를 직접제어할 수 있는 기계적인 조작신호를 발생하는 액튜에이터부와 수로 및 수차발전기부와 수차의 속도를 검출하여 궤환시키는 속도검출부로 구성되어 있다.
이를 간략화 시켜 전달함수 형태로 표현하면 그림 2.2와 같이 블록도로 나타낼수 있으며 이들 전체를 전달함수 식으로 표현하면 $G_T(s)$는 식(2.1)과 같다.

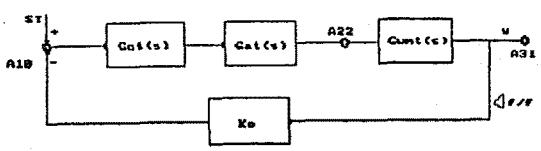


그림2.2 간략화한 수차제어계 블록선도
Fig2.2 Block Diagram of Turbine Control System

$$G_T(s) = \frac{Gct(s)Gat(s)Gwmt(s)}{1+K_0Gct(s)Gat(s)Gwmt(s)} \quad \text{----------(2.1)}$$

여기에서
Gct(s)는 PID 제어부의 전체 전달함수

$$Gct(s)=K_1\ \frac{(KpTiTd+KdTiTd)S^2+(KpTi+Td)S+1}{TiTdS^2+TiS} \quad ---(2.2)$$

Gat(s)는 액튜레이터부의 전체 전달함수

$$Gat(s)=\frac{K_2Ga(s)}{1+K_2K_3Ga(s)} \quad ----------(2.3)$$

$$Ga(s)=(\frac{K_5}{MS^2+CS+K_7})(\frac{1}{1+K_1S})(\frac{1}{TsS+K_6})(\frac{K_8}{TcS})$$

Gwmt(s)는 수로와 수차발전기의 전체 전달함수

$$Gwmt(s)=(\frac{1-TwS}{1+0.5TwS})(\frac{1}{TmS}) \quad ----------(2.4)$$

이며,
상수는 설계시 제시된 값을 기준으로 대입하고 제어기의 각 변수값은 현장에서 조정가능한 범위에서 운영자가 임의로 설정할수 있도록 하였다.

3. 제어기 변수 추론방법

본 연구에서 제안한 추론방법은 일반적인 제어기의 제어입력을 추론하는 방식이 아니라 시스템의 특성상 제어기의 파라메타를 추론하는 방법을 제시하였다.
퍼지추론의 입력 변수는 기준모델과 실제 플랜트 출력사이의 비교값인 피크편차(ΔP)와 피크시간편차(Δt)의 관계에서 계산된 최대편차값 $R(\sqrt{\Delta P^2+\Delta t})$ 과 각 $\theta(\cos^{-1}\Delta t/R)$를 입력 소속함수로 정의하였고 출력변수로는 기준 모델과 실제 플랜트의 출력을 비교하여 제어기의 파라메타 Ti,Td,Kp,Kd를 4개의 출력값으로 사용하였다.
실제 플랜트의 특성상 편차값의 미세조정이 요구되어 입력편차값을 ZO 부근에서 미세 제어가 가능하도록 소속함수를 좁게 설정하여 비선형적으로 배치하였으며 편차와 편차시간 사이의 각(θ)은 선형적으로 설정하였다.

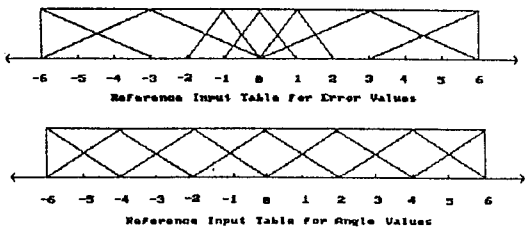


그림 3.1 입력 기준표의 소속함수 분포
Fig 3.1 Membership Functions of Input Reference Table

표1. Kd 규칙의 Look-Up 테이블
Table 1. Look-Up Table of Kd Rule-Base

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NS	ZO	ZO	ZO	PS	ZO	NS
NM	NS	ZO	ZO	ZO	PS	ZO	NS
NS	NS	ZO	ZO	PS	PM	ZO	NM
ZO	NS	ZO	ZO	PS	PM	ZO	NM
PS	NS	ZO	ZO	PS	PM	ZO	NB
PM	NS	ZO	ZO	PM	PB	ZO	NB
PB	NS	ZO	PS	PM	PB	ZO	NB

NB : Negative Big
NM : Negative Middle
NS : Negative Small
ZO : Zero
PS : Positive Small
PM : Positive Middle
PB : Positive Big

입력값에 대한 출력 소속함수는 표1과 같이 7개의 소속함수로 구성하였으며 Ti,Td,Ki에 대해서도 표1과 같은구성으로 각 출력 소속함수의 상관관계를 고려하여 제어규칙을 설정하였다.
이와같은 제어규칙에 따라 다음과 같이 언어 형태의 제어규칙으로 표현할 수 있으며

IF R is PS and θ is PM ,
THEN Kp is NS and Kd is ZO and Ti is PM and Td is NS
IF R is NS and θ is PB ,
THEN Kp is ZO and Kd is NM and Ti is ZO and Td is NS

위와같은 제어규칙에 정의된 소속함수를 다음과 같은 Max-Min 방법으로 추론하였다.[4]

$$\text{Max-Min}: R_1(x,y),\ (x,y)\in X\times Y$$
$$R_2(y,z),\ (y,z)\in Y\times Z$$
$$R_1 \circ R_2(x,z)=\{[(x,z),\ \text{Max}(\mu_{R1}(x,y)*\mu_{R2}(y,z))]\ |\ x\in X,\ y\in Y,\ z\in Z\}$$

R_1 , R_2 : 퍼지 관계(Fuzzy Relation)

위와같이 추론된 결과는 실제 플랜트에 적용가능한 입력값을 얻도록 비퍼지화 과정를 거쳐 정량화 시켜야하는데 이러한 비퍼지화 방법으로는 여러가지 이론이 제시되고있다.[5]
이들방법 중 본 연구에서는 무게 중심법(C.O.G)을 도입하여 다음과 같은 비퍼지화 수식을 4개의 제어기 파라메타 각각에 대하여 계산하였다.

$$\mu_i=\sum_{j=1}^{N} Kd_j\,\mu(Kd_j)\ /\ \sum_{j=1}^{N}\mu(Kd_j)$$

4. 동조기 구성도

가. 하드웨어 구성

수차발전기의 속도제어를 위한 동조방법은 수차발전기가 갖는 고유의 특성 때문에 기존의 동조방법을 적용하기가 매우어려워 그림 4.1과 같이 기준 특성곡선과 동조대상 플랜트를 병렬로 구성하고 실험신호(0.02 PU Step Signal)를 인가했을때 A/D변환한 플랜트의 응답신호를 기준패턴과 비교하여 피크편차와 피크시간편차의 산출값을 퍼지추론을 이용하여 최적의 PID파라메터를 얻고 그결과를 운영자에게 제공하도록 구성하였고 이 동조기는 산업현장의 열악한 환경조건에 강인하도록 386 산업용 PC를 기초로 제작하였다.

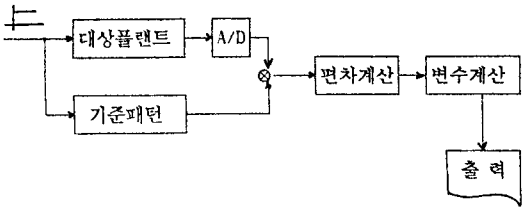


그림 4.1 동조기 구성도
Fig 4.1 Block Diagram for Tuner

나. 소프트웨어 구성

본 실험은 실험자가 동조기에 기입력된 기준패턴을 선택하고 대상플랜트의 신호검출부와 동조기를 인터페이스한후 실험신호 입력용 기능키(Funtion Key)를 누르면 그림4.2의 흐름도에 따라서 동조하고 분석결과가 다음의 판단조건으로부터 재동조나 동조실험을 완료하여 파라메터값을 출력하게 된다

if P>0.01 or T>0.75 then 재동조
if P≤0.01 or T≤0.75 then 출력

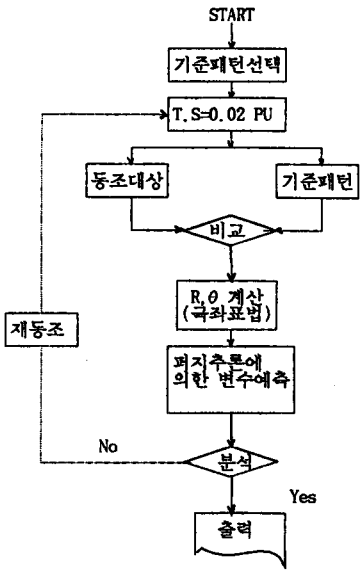


그림 4.2 동조실험 흐름도
Fig 4.2 Flow Chart of Tuning

5. 시뮬레이션

2장에서 실시한 시스템 모델링에 의해 산출된 식(2.1)의 수차제어계 전체전달함수에 아래의 상수를 적용시키고

Ko:Speed detector	5
k1:Speed control gain	20
k2:Power amplifier	0.02
k3:Poision detector	10
k5:Converter force	0.99
M :Weight of converter moving element	$6.2*10^{-5}$
C :Coefficient of viscosity	$2.49*10^{-2}$
k7:Spring Constant 0.5	
T1:Time constant of converter position	0.02
Ts:Time constant of distributing valve	0.01
k6:Restoring ratio	0.07
Tc:Time constant of servomotor	0.112
k8:Conversion coefficient of servomotor stroke	$1.935*10^{-3}$
Tw:Water starting time	1.51
Tm:Mechanical starting time	8.63

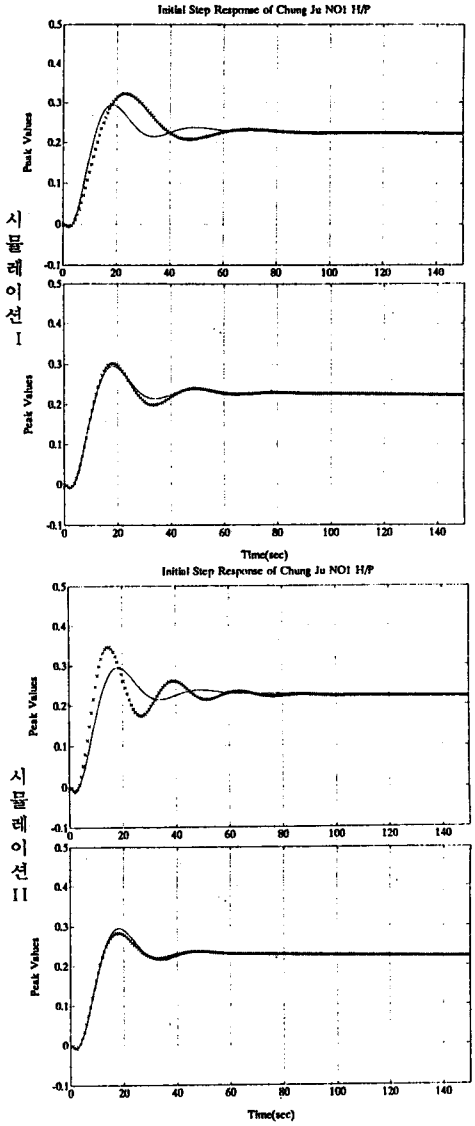
제어기 변수(Kp,Kd,Ti,Td)는 현장에서 허용되는 범위내에서 운영자가 임의로 입력하도록 하였으며 발전기 준공시험시 제작자가 제시한 값을 기준패턴으로 입력하면 전달함수 Gr(s)는

Kp:Propertional gain	0.14(0 - 0.49)
Kd:Derivative gain	0.3 (0 - 1)
Ti:Integral time constant	600 (40 - 1040)
Td:Derivative time constant	3.5(2 - 53)

$$Gr(s)=\frac{-11.869\,S^3+6.7367\,S^2+0.7313\,S+0.0085}{1.9e^{-6}S^9+9.96e^{-4}S^8+6.1e^{-2}S^7+1.24S^6+7.23S^5+9.65S^4+2.34S^3+0.51S^2+0.03S+3.86e^{-4}}$$

분모의 최대차수가 S^9의 함수가 얻어지며 이것을 기준패턴으로 각각 다른 특성을 갖는 2종류를 시뮬레이션 결과로 제시한다.

변 수	Kp	Kd	Ti	Td	K6
시뮬레이션 I	0.16	0.25	400	3.0	0.09
	0.14	0.39	750	4.21	0.09
시뮬레이션 II	0.2	0.4	300	3.2	0.06
	0.13	0.27	652	3.26	0.06



6. 결론

본 연구에서는 고차계이며 비선형성을 갖는 수차 속도제어용 PID 제어기의 최적변수를 퍼지추론을 이용하여 기준패턴 추종 동조기법을 제시하였고, 이동조기법을 이용하여 충주1수력 발전소 수차제어계를 모델로 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 기준패턴 추종성이 양호함을 규명하였다.

따라서 연구결과를 토대로 수차제어계 전용의 운영유지용 동조기로 산업용 컴퓨터를 이용하여 지금까지 수차속도제어용 조속기의 경험적 동조에 대한 문제점을 개선하여 시스템의 효율성 증대는 물론 향후 개발적용될 컴퓨터를 근간으로 한 수차제어기의 적응제어기로서 확장 적용할 수 있도록 연구를 진행할 계획이다.

참고문헌

1. Q.H.Wu, B.W.Hogg, "Auto-Tuning Optimal PID Automatic Voltage Regulator for Sychronous Generators
2. Y.Nishikawa, et al., "A Method for Auto-Tuning of PID Control Parameters," Automatica, Vol.20, No.3, pp.321 -332, 1984
3. "온-라인 PID 자동동조기 개발연구," 한국수자원공사 1992. 중간보고서
4. A.Kaufmann, Theory of Fuzzy Subsets, Academic Press, Inc, 1975 pp.60-75.
5. R.R.Yager, L.A.Zadeh, An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems, Kluwer Academic Publishers, 1992 pp.69-96