

전문가 제어기 구현을 위한 자동동조방법

○ 설남오* 김성중◆ 이장구** 신동용* 박종국* 최중수*

- ◆ 전북대학교 전기공학과 교수
- * 전북대학교 전기공학과 석사과정
- ** ETRI 선임 연구원

Auto - Tuning Method for Expert Controller Implementation

○ N.O.Soul* S.J.Kim◆ C.K.Lee** D.Y.Sin* J.K.Park* J.S.Choi*

- ◆ Prof. of Chonbuk National Univ. Electrical Eng.
- * Chonbuk National Univ. Electrical Eng.
- ** ETRI

Abstract

In this paper, it is introduced about Auto-Tuning Method which applied to Expert Controller. This method constructs heuristic knowledge of the tuning experiment in order to realize relay tuning theory of Astrom & Hagglund. This method applies to various Plant and shows utility which is used for Controller design of PID group. Result of simulation showed superiority for speed reponse and robustness of all Plant.

1. 서 론

근래에 이르러 보다 정교한 현대 제어이론이 개발되었음에도 PID(Proportional Integral Derivative)는 현재까지 산업현장에서 가장 널리 운영되는 제어 알고리즘이다. 이러한 PID 제어기는 플랜트에 따라 여러가지 형태가 제안되고 있지만, 보다 중요한 요소로서 PID 제어기의 계수들을 동조시키는 문제가 남아있다. 지금까지 산업현장에서 사용되고 있는 PID 제어기는 숙련된 조작자(Operator)의 경험과 지식을 근거로 시행착오를 거쳐 동조되고 있는데, 이는 많은 시간과 비용을 요구하며 프로세서 동특성이 변하는 플랜트에 따라 수시로 계수를 조정하여야하는 단점이 있다.

일반적으로 널리 쓰이는 동조방법은 시간영역에서의 동조방법과 주파수영역에서의 동조방법으로 크게 분류할 수 있다. 시간영역에서의 방법은 플랜트에 대한 저차의 근사모델의 매개변수들을 추정하여 플랜트를 식별한 후, 추정된 근사모델에 대해 시간영역에서 주어지는 제어조건을 만족하도록 PID 제어기의 매개변수들을 결정하는 방식을 취하고 있다. 시간영역에서의 동조방법이 갖는 공통적인 단점은 차수나 지연시간과 같은 플랜트에 대한 사전지식이 필요하고, 실제 플랜트의 전달함수와 가정한 근사모델의 차이에 대해 강인성(Robustness)을 가지지 못하며, 복잡한 계산을 마이크로프로세서의 계산능력으로 수행하기에 적합하지 못하다는 것이다. 반면에 주파수영역에서의 동조방법들은

플랜트의 위상뒤집이 180° 생기는 주파수 즉, 위상 통과주파수(Phase Crossover Frequency) 근처의 1개 내지 2개의 주파수에 대한 플랜트의 응답을 측정하여 시스템을 식별하고 그 주파수 응답으로 부터 적당한 위상여유와 이득여유를 갖도록 PID 제어기의 계수들을 동조하는 방식을 사용하므로 시간영역에서의 방법보다 간단하며 식별오차에 대한 강인성(Robustness)이 있어 많은 플랜트에 적용할 수 있다. PID 제어기의 체계적인 동조방법은 1943년에 Ziegler와 Nichols에 의하여 처음 제시되었다. 이 방법은 주파수영역의 방법으로서 현재 산업현장에서 널리 쓰이나 일정한 진동을 얻어내고 자동화하기가 어려운 단점이 있다. 근래에 Astrom과 Hagglund는 릴레이를 이용하여 이 단점을 해결할 수 있는 새로운 동조방법을 제안하였다.

따라서 본 연구에서는 산업현장에 이용할 수 있는 전문가 제어기의 개발추세에 비추어 전문가 제어기에 적용할 수 있는 경험지식을 이용한 릴레이 동조실험을 Astrom과 Hagglund가 제안한 릴레이 동조이론을 기반으로 구현하여 이를 다양한 차수의 플랜트에 적용했을 때 강인성을 보이고, 여기서 얻어진 정보를 PID제어의 제어기설계에 적용하여 성능이 우수함을 보이고자 한다.

2. 동 조 실험

가. Ziegler-Nichols 동조실험

Ziegler와 Nichols의 실험은 개루프 시스템에서 Niquist선상의 임계점의 값으로부터 결정된다. 이 방법은 대부분의 플랜트들이 큰 이득을 갖는 제어기를 이용하여 궤환부를 형성하고 비례이득을 점차 크게하여 일정한 진동이 일어나게 한 다음 그 진동의 진폭과 주기로 부터 최적의 PID 매개변수값을 도출하는 것이다.

이들은 다음과 같은 관계가 있다. 입력신호 u 와 출력 y 는 다음의 식 (1)과 같다.

$$u = -K y \quad (1)$$

단, K: 시스템 이득, u와 y는 각각 입출력값

이 때에 무우프이득은 발진을 유지하기 위해서는 1이 되어야 함으로 식 (2)과 같다.

$$k_c * G(i\omega_c) = 1 \quad (2)$$

또한, 플랜트를 안정도의 한계영역으로 가져오게 하는 이득을 임계이득(k_c)이라 하면, 식 (3)과 같이 나타난다.

$$|G(i\omega_c)| = -1 / k_c \quad (3)$$

Ziegler와 Nichols의 동조방법은 실험이 단순하고 플랜트 자체의 임계주파수를 구한다는데에 장점이 있으나, 일정한 진동을 얻어내기가 어렵고, 자동화 시키기에는 매우 어려움이 많다.

나. 릴레이 동조실험

이 릴레이 동조실험은 Ziegler와 Nichols 동조실험의 단점을 릴레이(Relay)를 이용하여 해결하고 위상여유와 이득여유를 보장하는 동조실험이다. 릴레이 동조방법의 기본 개념은 그림 2-1과 같이 케환루프에 릴레이를 도입하여 플랜트가 인위적으로 발진하도록 하는 것이다. 여기에서 d는 릴레이 진폭이며 ϵ 는 릴레이 히스테리시스(Hysteresis)폭이다.

릴레이를 이용한 동조실험으로 얻어지는 공정에 관한 지식은 제어하고자 하는 플랜트의 게부프 이득을 Nyquist 선상의 한 점값으로부터 도출하는 것이다. 이 점은 Nyquist 선과 음성 실축의 교차점으로 일반적으로 임계점(Critical Point)이라 칭하며 이때 이득을 임계이득(Critical Gain, k_c)과 임계주기(Critical Period, t_c)라 한다.

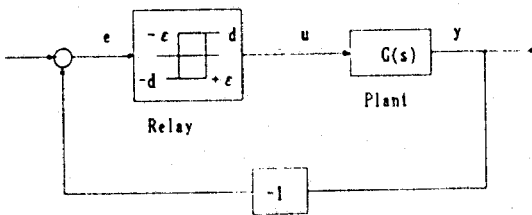


그림 2-1. 릴레이 제어하에 케환루프
Fig. 2-1. Feedback Loop under Relay Control

일반적으로 릴레이 제어하에서 입출력 신호 형태는 입력은 구형파이고 출력은 발진형태임을 알 수 있다. 또한, 공정 입력과 출력은 위상 편차를 갖고 발진 진폭의 크기는 릴레이 진폭에 비례한다. 릴레이 제어하에서 시스템이 어떻게 동작하는가를 설명하기 위하여 릴레이 출력이 Fourier급수로 전개되고 고주파 성분은 효과적으로 감소한다는 가정하에 묘사함수법(Describing Function Method)을 도입하여 릴레이 동조방법을 해석한다.

이때, 임계이득(Critical Gain) k_c 와 임계주기(Critical Period) t_c 는 다음과 같다.

$$k_c = 4 d / a \pi \quad (4)$$

$$t_c = 2 \pi / \omega_c \quad (5)$$

여기에서 릴레이의 주기와 진폭 값으로부터 k_c 와 t_c 를 자동적으로 구할 수 있다.

위와 같은 이론을 실제적으로 구현하기 위해서는 많은 실험과 현장운전자의 경험지식이 필요하며 이를 다음 장에서술하였다.

3. 경험지식을 이용한 릴레이 동조실험의 구현

가. 릴레이 동조실험의 구현

릴레이 동조실험은 상당히 적은 양의 사전정보를 요구하며 초기에 결정되어야 할 계수는 릴레이 진폭, 히스테리시스폭, Bias Level과 허용발진폭 등이다. 그러나 이러한 사전정보는 릴레이 동조실험이 모든 플랜트에 대하여 적절히 동작하도록 자동적으로 제공되어야하며, 이부분은 많은 실험과 현장운전자의 경험적 지식이 결합되어야한다. 그 내용을 요약 하면 다음과 같다. 임계이득과 주기를 결정할 수 있는 자동적인 방법은 주기는 영점교차(Zero-Crossing) 사이의 시간을 측정하고 진폭은 출력의 Peak to Peak값을 측정함으로써 얻어진다. 즉, 이득과 주기 계산은 영점교차수와 출력의 비교에 의하여 이루어지며 수백 바이트(Byte)로 프로그램 된다. 여기에서 노하우는 릴레이 입력신호의 진폭을 자동으로 조정하고 발진의 안정유무를 결정하는 일이다.

동조실험은 3단계로 나뉘어 수행되며, 1단계에서는 임의의 평형값을 결정하고 출력이 평형점에 도달하도록 하는 기능을 수행한다. 평형점은 임의로 설정할 수 있지만 실제로 작동되는 설정값 근처에서 공정의 특성을 감지하고, 릴레이 진폭이 설정값을 넘지 않도록 정하는 것이 일반적이다. 2단계에서는 평형점에 도달할 때 제어신호에 기초하여 릴레이 진폭을 조정한다. 제 3 단계에서는 플랜트 출력이 안정한 발진상태인가를 확인한 후, 앞서 언급한 릴레이식에 의하여 임계 이득과 주기를 구한다.

나. 릴레이 동조실험으로 부터 취득정보

릴레이 동조실험은 주로 게부프 Nyquist 선상의 임의의 한점 값에 대한 정보를 취득하는 것이며, 실험에 의하여 임계이득(k_c)과 임계주기(t_c)가 자동적으로 구해지고, 발진 유형에 따라 플랜트의 차수를 1차계와 고차계로 분류할 수 있었다. 예를 들어 1차계의 플랜트는 그림 과 같이 릴레이 입력신호가 스위칭하는 순간에 출력 미분값의 부호가 변화하지만 고차계는 출력파형이 일정한 평형파이다.

또한, 플랜트의 지연시간(L)은 릴레이 발진형태로 부

터 τ 와 t_c 를 이용하여 구한다. 즉, 지연시간은 $L < \tau/h$, 샘플링시간 h 는 $t_c/h(\text{단}, n > 2)$ 로 선택할 수 있다.

다. 릴레이 동조실험을 위한 경험지식

본 연구에 제시된 릴레이 동조실험을 수행하기 위한 경험지식을 아래와 같이 서술한다.

[1] 릴레이 실험 작동점 선정 경험지식

$$AS = (K_1 * SP + K_2 * y_0) / (K_1 + K_2)$$

단, K_1, K_2 는 $0 < K_1 < 1, 0 < K_2 < 1$ 이고 $K_1 + K_2 = 1$ 인 값

AS: 릴레이 실험 작동점

SP: 설정값

y_0 : 현재 플랜트의 출력값

$$\text{IF } y < SP \text{ THEN } AS = (K_1 * SP + K_2 * y_0) / (K_1 + K_2)$$

$$K_1 = 0.6 \quad K_2 = 0.4$$

[2] REGULATING 경험지식

$$\text{IF } e(k) < e^* \text{ THEN } u(k) = P * e(k) + u(k-1)$$

$$e(k) = AS - y(k), \quad e^* = 0.1 * SP$$

ELSE N 샘플동안 $u(k) = u(k-1)$

[3] 릴레이 실험가동을 위한 안정상태 유무 판별 경험지식

$$\text{IF } |1/N \sum y(t-i) - 1/N \sum y(t-T-i)| < 0.1 * SP$$

THEN 릴레이 실험 가동

ELSE T/N 샘플동안 Regulating 경험지식 적용

[4] 허용 발진폭 결정 경험지식

$$POB = 0.3 * SP$$

$$\text{IF } (AS + POB) > SP \text{ THEN } POB = SP - AS$$

$$\text{IF } (AS - POB) < y_0 \text{ THEN } POB = AS - y_0$$

[5] 플랜트 분류를 위한 경험규칙

$$\text{IF } \tau < 0.07 * T_c \text{ THEN 플랜트는 1차계}$$

ELSE 플랜트는 고차계

본 연구에서 제시된 릴레이 동조실험을 수행하기 위한 몇가지의 경험지식을 전향적 추론방식으로 위와 같이 서술하였다. 릴레이 동조실험에 대한 새로운 경험지식이 얻어 지는대로 보완할 예정이다.

5. 시뮬레이션

임의의 플랜트를 가지고 본 연구에 제시된 릴레이 동조 실험을 수행하였다.

플랜트 1차계, 1차지연계, 2차계, 3차계를 가지고 시뮬레이션한 결과, 1차계의 플랜트 $G(s) = 1/(1+20s)$ 는 $t_c=20$, $kc=9.33$ 의 값을 가지며 릴레이 발진곡선은 그림 5-1과 같다. 이 그림에서 1차계는 지연시간이 없고 출력 파형이 삼각파에 가깝게 나타남을 알 수있다. 1차지연계인 플랜트 $G(s) = e^{-4s}/(1+20s)$ 는 실험에 의해 $t_c=29$, $kc=4.16$ 의 값이 구해졌고 이에 대한 릴레이 발진곡선이 그림 5-2와 같으며,

1차계와는 달리 지연시간이 있음을 알 수 있다. 2차계 플랜트 $G(s) = 12e^{-4s}/(s^2 + 2*0.346*s + 1^2)$ 는 실험에 의해 $t_c=12$, $kc=0.806$ 의 값이 구해졌고 그림 5-3과 같이 안정한 발진을 얻을 때까지 자동으로 진폭을 조절하는 것을 보여준다. 3차계인 플랜트 $G(s) = (1+2s)e^{-4s}/(1+10s)(1+7s)(1+3s)$ 는 $t_c=39$, $kc=2.9436$ 의 값이 되고, 그림 5-4 릴레이 출력곡선이 정현파에 가깝게 나타났다.

위의 결과에서 살펴본 바와 같이, 이 실험은 미지의 플랜트에 대해 차수에 관계없이 잘 동조됨으로써 제어기설계에 필요한 유용한 정보를 얻을 수 있음을 보여주었다.

또한, 실험에 의해 얻어진 3차계의 정보를 가지고 Astrom과 Hagglund가 제안한 동조식에 적용, PID제어기를 설계하여 시뮬레이션 결과, 전반적으로 성능이 우수하고 건실함을 보였다.

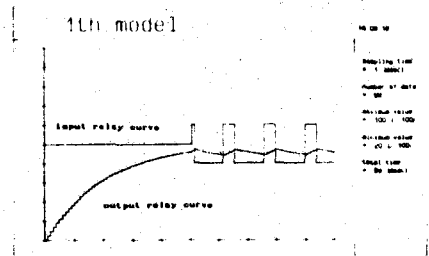


그림 5-1. 릴레이 발진 곡선(1차계)

Fig. 5-1. Relay Oscillation Curve(1th system)

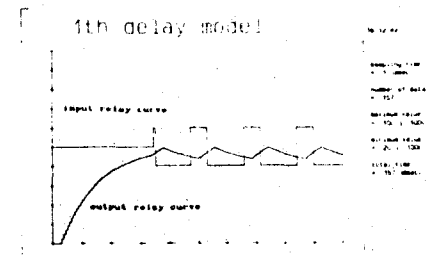


그림 5-2. 릴레이 발진 곡선(1차 지연계)

Fig. 5-2. Relay Oscillation Curve(1th delay)

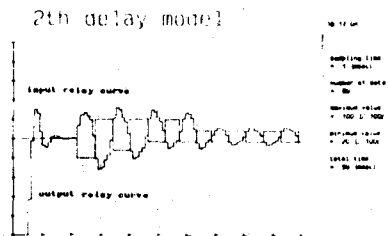


그림 5-3. 릴레이 발진 곡선(2차계)

Fig. 5-3. Relay Oscillation Curve(2nd system)

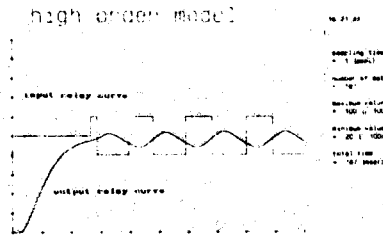


그림 5-4. 릴레이 발진 곡선(3차계)
Fig. 5-4. Relay Oscillation Curve(3th system)

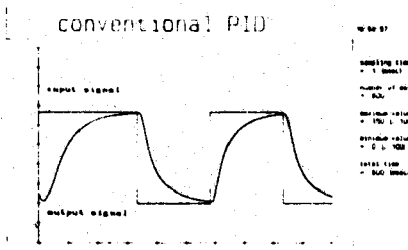


그림 5-1. PID 제어기의 응답 곡선
Fig. 5-1. Response Curve of PID Controller

[2] K. J. Astrom and Hagglund, "Automatic Tuning of Simple Regulators with Specification on Phase and Amplitude Margins," *Automatica*, Vol. 20, No. 5, pp. 645-651, 1984.

[3] Astrom, K.J., Anton, J.J. and Arzen, K.E., "Expert Control," *Automatica*, Vol.22, No. 3, pp. 277-286, 1986.

[4] Sripada, N.R., Fisher, D.G. and Morris, A.J., "AI Application for Process Regulation and Servo Control," *IEEE Proc.*, Vol. 134, July 1987.

[5] K. J. Astrom and Hagglund, T., "Automatic Tuning of Simple Regulators on Adaptive Systems in Control and Signal Processing," *Pro. IFAC Workshops, San Francisco*, 1983.

[6] 이 창구외 2인, "PID제어기의 동조방법에 관한 연구", *과기처 '87 특정연구 결과 논문집*, pp. 235-238, 1988.

[7] 김 성중외 2인, "감독기능을 갖는 적응제어기 구성에 관한 연구", *전기학회 논문지 Vol. 37, No. 12*, pp. 894-902, Dec. 1988.

6. 결 론

본 연구에서는 Astrom과 Hagglund가 제안한 동조이론을 기반으로 경험지식을 구축하여 전문가 제어기에 적용할 수 있는 동조방법을 실현하였다.

릴레이 동조실험에서 다양한 플랜트를 대상으로 시뮬레이션한 결과, 모든 플랜트에 대한 만족할 만한 사전정보를 얻을 수 있었고, 또한 이 정보를 가지고 PID제어의 제어기에 적용한 결과 성능이 우수하고 결실함을 보였다.

따라서 이 기법은 전문가 제어기 구성에 있어서 동조방법으로 유용하게 이용되리라 사료되며, 앞으로 전문가 제어기에 적용하기 위해서 릴레이 동조실험에 대한 경험지식의 효율적인 적용과 수정보완이 요구된다.

참 고 문 헌

[1] J. C. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum Settings for Automatic Controllers", *Trans. ASME*, Vol. 65, pp. 433-444, 1943.