

자동 자기 동조 PID 제어기의 전문가 제어

○

채 장현*, 이장훈**, 우광방**

* 연세대학교 대학원 박사과정. ** 연세대학교 전기공학과 교수.

A study on Expert control of Self-Tuning PID Controller

Chang-Hyun Chai, Chang-Hoon Lee, Kwang-Bang Woo.
 *Dept. of Electrical Engineering Yonsei University.

Abstract - Expert systems have a variety of potential applications in process control. The application domain ranges from the entire plant system to a single loop system. Both off-line and real-time problems may be realized. In this paper, expert system is employed as a part of a single control loop of PID Controller with self-tuning. The goal of expert system in the present study is to build up the necessary process knowledge required for efficient control. In order to achieve this process, the development of an expert system and a prototype model is carried out. OPS5, a rule based production system, is utilized in experiment, and common LISP is used for man-machine interface.

1. 서론.

PID 제어기는 공장 제어산업의 다양한 공정에서 견실(Robust)하고 효과적이나 공정조건이 변화나 시변, 비선형 동특성을 갖는 시스템에서는 최적의 기능을 유지하기 위해 수시로 제어기의 계수를 재조정하여야만 한다. 최근 PID 제어기의 계수가 계속적으로 조정되는 자기동조 제어 기법과 PID 제어기의 계수 조정 후 자기동조기가 Turn-OFF 되는 자기동조 제어기법에 대한 연구가 계속되어 일부 실제 공정에 실용되는 단계에 도달하고 있다. 그러나 이 제어 기법과 산업체의 여러가지 공정에 적용하기에는 많은 제약과 조건이 요구되고 전문가의 숙련된 경험이 절실히 필요하므로 이러한 어려움을 전문가 시스템으로 해결하려는 연구가 검토되고 있다.

전문가 시스템은 공정 제어 분야에 있어 단일패루프에서 전체 플랜트, 또는 OFF-LINE 및 ON-LINE 적용 등 응용 분야가 광범위하다.

본 연구에서는 전문가 시스템을 단일패루프 실시간 제어에 사용하며 또한 제어 성능이 우수하도록 제어기에 다당하고 보다 높은 수준의 제어 지식을 적용하는데 중점을 둔다.

2. 자동 자기 동조 PID 제어기.

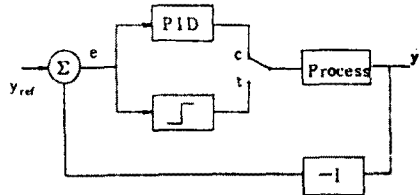
일반적으로 디지털 제어에서 사용되는 PID 알고리즘은 적분 PID 알고리즘과 병렬 PID 알고리즘으로 구분되는데 병렬 PID 알고리즘이 PID 제어기 계수가 시간 영역에서 상호 작용(interacting)을 하지 않는다는 잇점이 있다. 병렬 PID 알고리즘의 전달함수는 식 (2-1)과 같다.

$$\frac{m(s)}{e(s)} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right) \quad (2-1)$$

여기서 $m(s)$ 는 제어계 출력이고 $e(s)$ 는 에러이다. 또한 디지털 시스템에서는 Aliasing 에러, 잡음과 입력신호의 상태들이 제어계에 상당한 영향을 미치는데 이러한 어려움은 귀환 경로에 디지털 필터를 사용하면 감소시킬 수 있으나 완전히 제거할 수는 없다.

현재까지 제시된 PID 제어기의 동조방법으로는 Ziegler-Nichols 방법이 가장 많이 사용되는 방법이나 한계진동 이득과 한계진동주기를 구하는데 있어서 증폭, 이득조정, 측정 및 입력신호 제공 등의 많은 문제점이 표출되었다.

이런 문제점을 개선하기 위하여 Astrom 과 Hagglund (3,4)는 (그림 2-1)과 같이 프로세스에 릴레이 요소를 갖는 계단부동물 연결하여 정확한 주기측정과 여자 입력을 자동적으로 제공하는 릴레이 제어를 이용 한계진동이득과 한계진동주기를 구하고 이를 적용하여 동조계수를 구하는 방식을 제안하였다.



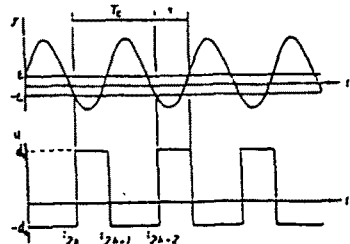
(그림 2-1). 릴레이 제어를 갖는 자기 동조기

고조파에서 적어도 π 의 위상지연을 갖는 시스템은 릴레이 제어하에서 임의의 주기를 가지고 발진하므로 만약 릴레이 증폭이 d , 출력 신호의 증폭이 a 라면 한계진동이득과 한계진동주기는 식 (2-2) 및 식 (2-3)과 같다.

$$\text{한계진동 이득 } k_c = 4d/a \quad (2-2)$$

$$\text{한계진동 주기 } t_c = 2\pi/k_c \quad (2-3)$$

잡음이 있는 공정에서는 히스테리시스를 갖는 릴레이 제어가 효과적이다. 또한 한계진동이득과 한계진동주기를 자동적으로 결정할 수 있는 방법은 (그림 2-2)에서와 같이 주기는 zero-crossing 사이의 시간을 측정하고 증폭은 출력의 peak-to-peak 값을 측정함으로써 얻어진다. 즉 측정 기법은 계수(Counting)와 비교(Comparison)에 의해 이루어진다.



(그림 2-2) 릴레이 제어의 입력 신호.

한계진동이득과 한계진동주기에 의해 자기동조계수를 결정하는 관계식은 식(2-4), (2-5), (2-6)과 같다.

$$u_c T_d - 1/u_c T_i = \tan \phi_m \quad (2-4)$$

$$T_i = \alpha T_d \quad (2-5)$$

$$T_d = (\tan \phi_m + \sqrt{4/\alpha + \tan^2 \phi_m})/2u_c \quad (2-6)$$

여기서 ϕ_m 은 위상마진이다.

Astrom과 Hagglund(3,4)에 의한 방법은 단위계단입력을 인가한 경우 긴 샘플링 주기에서 우수한 특성을 나타내고 증폭마진을 설계자의 요구대로 할 수 있으며 마진에 따라 rise time과 settling time을 조정할 수 있으며 구형파 입력 인가 시 증폭마진의 적절한 선정에 의하여 기준입력이 변하여도 overshoot나 undershoot 현상이 발생되지 않고, 프로세스 계수 변화와 지연시간의 변화에도 거의 영향을 받지 않는 좋은 특성을 나타낸다.

따라서 릴레이 제어하에서 Astrom과 Hagglund(4) 방법에 의해 PID 계수값을 선형동조하고 최소자승기법에 의하여 프로세스 계수를 추정하여 임의의 시간이 경과한 후에 자동적으로 자동자기동조 PID 모드로 스위칭하는 자동자기동조 PID 제어를 구성하여 사용한다.

3. 공정 제어분야에서의 전문가 시스템.

전문가 시스템은 인공지능의 한 응용분야로 어떤 특정 영역에 대한 지식과 여러 전문가의 학습과 연구, 경험 등을 토대로 얻은 경험적 지식을 사용하여 지식베이스를 형성한 후 추론 장치(Inference engine)를 통해 전문가가 필요하거나 종래의 컴퓨터가 해결이 불가능한 문제에 대해 전문가의 지식과 조언을 제공하는 전문분야 지향의 컴퓨터 시스템이다. 이의 실용적 응용 사례는 상상보다는 고수준의 지식이 필요한 분야로 공정 제어분야도 여기에 해당된다

공정제어에 경험적 문제해결 방법(Heuristics)을 부가하는 개념은 이미 새로운 것이 아니다. Crossman과 Cooke은 변화가 늦은 수동제어 시스템을 위한 성능향상을 꾀하는 경험적 문제해결 프로그램을 제시하였다. 공정제어에서 가능한 OFF LINE 응용의 예는 공정설계와 제어설계이다. 공정설계에는 명확한 해답이 없으나 공정설계가 제어성능에 큰 영향을 미치기 때문에 전문가 시스템의 지원은 높은 가치가 있다. 제어설계에 있어서 전문가 시스템은 전반적인 제어구조의 선택에 도움을 줄 수 있다. 또한 전문가 시스템은 컴퓨터에 의한 제어 설계 패키지와 함께 사용할 수 있다. 그리고, 적응제어의 계수조정에도 사용되었다. 그러나 OFF LINE에 사용된 전문가 시스템은 불완전한 사실로부터 결론을 유도한 후에 그 사실들이 변할 가능성이 있으므로 역추진을 해서 그 결론들을 재고해야만 한다. 이러한 문제점을 대처하는 방안이 연구되고 있으나 만족할만한 성과는 없다.

실시간 전문가 시스템에서는 위와 같은 문제점을 회피하기 위해 여러가지 방법을 사용한다. 예를 들어 PICON(8)에 사용된 방법은 모든 데이터 베이스 요소에 존재시간을 부여하고 규칙들을 주기적으로 테스트하여 일정한 시간이 지나면 모든 결론들이 제거된다. 이는 데이터 베이스 요소들이 복잡한 상황에서만 유효하다고 생각할 수 있다. 일반적으로는 이런 문제들을 명확하게 규칙의 부분으로 다루는 Engineering Ad hoc 방법이 널리 사용된다. 실시간 응용의 예는 감시와 진단이다. 핵발전소나 화학공정에서 플랜트 전문지식은 공정사고나 위험 경보의 원인을 찾거나 보정행위 위해 적절한 조언을 제시한다. 또한 감시용 전문가 시스템은 플랜트의 최적제어에 도움을 줄 수 있다 이러한 적용분야에서 전문가 시스템은 오퍼레이터로 사용된다. 전문가 시스템으로는 제어프로도 사용되어 제어대상에 직접 영향을 줄 수 있다. 전체적으로 전문가는 시스템은 플랜트를 최적제어 하기 위한 set point 제어로 사용된다. 항공산업에서는 전문가 시스템을 승격에 대한 비행제어 시스템에 사용한 예가 있다.

본 연구에서는 전문가 시스템이 가능한 많은 정보를 얻도록 계획 루프에 규칙기반 전문가 시스템을 도입하는데 있다. 이것은 서로 다른 데이터 알고리즘을 지능적으로 공정에 적용함으로써 얻어진다. 수치알고리즘은 제어알고리즘, 동정알고리즘, 감시 알고리즘의 형태로 구분되며 전문가 시스템은 어떤 순서로 알고리즘을 적용할 것인지를 결정하고 그들의 계수값을 계산한다. 하나의 알고리즘을 적용함으로써 제어대상에 대한 지식베이스를 증가시키며 다른 알고리즘의 적용에도 영향을 미친다. 현존하는 다른 프로그래머는 하나의 제어 알고리즘과 논리조건들의 'safety

jacket'들로 구성된다. Safety jacket은 일반적으로 프로그램 코드를 지배하는 논리계통이다. 이것들은 수정하기가 어렵고 코드에 대한 해석도 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 이러한 코드들을 전문가 시스템의 규칙적으로 최대한 구현하여 수치 알고리즘과 발전과 유지물 간소화하는 가지논리(Branching logic)와의 구별을 명확히 한다. 이를 위해 서로 다른 알고리즘을 결합하는 것이 바람직하다. 한 예로 자기동조제어에서 동정알고리즘으로 정상상태시에 사용하는 제어기와 공정의 시작 등에 사용하는 건실한(Robust) 제어기의 결합이 있다. 그러나 알고리즘을 조합함에 따라 논리 수정에 부가적인 요구사항이 생기고 구조적인 구현이 필요하게 된다.

고수준의 제어를 위해서는 좋은 공정지식이 필요하다. 적응제어기는 이러한 지식 중 일부를 공정에서 뽑아낼 수 있지만 시스템 차수나 시간지연계수 등의 사전지식(A priori information)이 필요하다. 또는 간단한 동정실험으로 공정의 지식을 추출해 낼 수 있으나 이렇게 얻은 지식은 본산적이고 부정확하며 때로는 모순적이다. 전문가 시스템은 이와같은 지식을 조사하고 향상시킬 수 있는 가능성을 제시한다.

앞에서 검토된 예에서 전문가 시스템은 공정 오퍼레이터의 지식과 함께 사용되었으나 본 연구에서는 제어공학자의 전문적인 지식이며 이렇게 구성된 제어기는 실제 산업제어기로서 또는 새로운 제어구조에 대해 빠른 모델링을 위한 시뮬레이션이다.

4. 전문가 제어 시스템의 구조

전문가 제어에 사용된 전문가 시스템은 OPS5이다. OPS5는 범칙구조 프로그래밍 시스템이다. 범칙구조 시스템은 원래 단기간 기억장치, 인지적 모형화(Cognitive modeling)에 사용된 전문가 시스템의 가장 일반적인 구조로 하나의 범칙구조 시스템, 범칙이라 불리는(Pattern Directed Modules)로 구성되어 있는데 PDM은 프로그램 유형이 제어 흐름과 데이터 활용을 확고하게 고정시킬 수 없으므로 결정과정의 매 단계마다 문제 상황을 면밀히 검토하고 적절히 대처하기 위해서 개발된 프로그램 유형이다. OPS5에서 프로그램의 데이터 객체(Data object)는 선언구역(Declaration section)에 저장되고 범칙들(Rules)은 프로덕션 구역(Production section)에 저장되는데 각각 좌변과 우변으로 구성되며 좌변은 데이터 베이스에 관한 명제들의 논리적 조합이며 우변은(Action)의 집합이다. 범칙구조 시스템은 범칙들과 우변에 의해서 행해지는 데이터의 수정으로부터 좌변에서 데이터를 검증해 낸다.

대개의 범칙구조 시스템은 프로덕션 시스템인데 프로덕션 시스템은 관련범칙과 데이터요소를 가려내는 선별(Selection)조치, 실효성있는 범칙을 실효성있는 데이터 요소와 대비시켜 조건을 충족시키는 범칙을 찾아내는 부합(Matching)조치, 조건이 충족된 범칙들 가운데 어떤것을 선택(Fire)해야 하는지를 결정하는 설계(Scheduling)조치와 선택된 범칙을 가려내어 실행하는 실행(Execution)조치로 구성하며 실행의 결과로 데이터 요소와 구조를 수정하는 시스템이다. 위에서 선택(Firing)이란 현재의 데이터를 부합시킨 패턴요소와 결합된 절차(Procedure)에 도달하고 그 절차를 실행하는 작업으로 만일 하나 이상의 범칙이 조건이 충족되면, 어떤것을 선택할지는 갈등-해결(Conflict-resolution)이란 경험적 문제 해결 방법을 써서 결정한다.

프로덕션 시스템의 추론장치는 후향추진식(Backward chaining)이거나 전향추진식(Forward chaining)이다. 후향추진식 시스템은 선택할 범칙의 탐색에 후진범칙을 써서 문제의 목표물 충족시키는 범칙을 수집하고 그러한 범칙의 후진들을 충족시키고자 먼저 전진범칙의 값을 찾아야 하며 증폭에 해당하는 각각의 전진들을 충족시키기위해 이 시스템은 그의 값을 충족시키는 후진범칙들을 수집한다. 목표를 만족시킬 인과사슬(Causal chain)을 찾아 후건에서 전건으로 그리고 다시 후건으로 범칙전체를 통해 거꾸로 작용해 가는 과정을 말하며, 전향추진식 시스템은 한 범칙이 지시하는 행동이 정지(Halt)를 요구할 때 까지 계속되는 사이클의 연속으로 각 사이클에서 시스템은 전진들을 채밀히 조사하고 데이터 베이스의 내용이 조건충족시키는 전건을 가진 모든 범칙을 결정한다. 그러한 범칙이 하나 이상이면 선택(Firing)으로 한가지를 선택하여 선택된 범칙과 결합된 모든 행동을 수행하고 그에 따라 데이터 베이스를 변경하는 과정을 말한다. OPS5는 전향추진식 추론

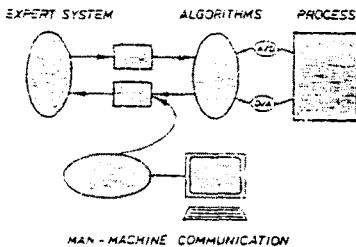
장치를 사용하면서, 후향추진식 문제해결 전략을 사용할 수 있도록 구성할 수 있다.

서술된 전문가 제어 시스템은 여러면에서 실시간 제어 시스템과 비교될 수 있다. 오퍼레이터는 현존의 공정과 같은 계획수행장치는 스케줄러(Scheduler)와 같다. 이것은 계획의 병렬위상(Parallel phases)에 있어서 더욱 그러하다. 실시간 제어시스템에서 공정은 일정시간이나 어떤 상황만큼 대기할 수 있다. 이는 전문가 시스템에서도 마찬가지로 상태를 동작중, 준비, 대기 등의 값을 할당하여 오퍼레이터가 법칙에서 대기시간 기능을 부르면 계획수행 장치에 의해 대기상태가 된다. 오퍼레이터는 대기시간이 지나면 활성화된다. 오퍼레이터는 또한 특성요소, 즉 알고리즘으로부터 특정한 정보가 데이터 베이스에 추가될 때까지 대기할 수 있다. 오퍼레이터는 두가지 방법으로 구현될 수 있는데 첫번째는 전체적인 데이터 베이스를 갖는 LISP 언어로 구현되며 이를 위해서는 LISP용 하드웨어가 필요하다. 두번째는 단일 LISP 프로세스로 구현할 수 있으며 이 경우 오퍼레이터들은 간섭(Interrupt)할 수 없다는 단점이 있다.

5. Implementation

AI의 관점에서 전문가 시스템의 on-line 제어 응용은 계획(Planning)과 감시(Monitoring)를 포함한다. 수치 알고리즘이 어떤 순서로, 어떻게 적용될 것이며 동작과 제어의 감시를 어떻게 할 것인지를 전체적으로 계획해야 한다. 따라서 다른 공정은 다른 시간 범위에서 동작하므로 전문가 시스템과 알고리즘은 서로 다른 우선 순위를 갖는 병렬 과정으로 구현되어야 한다. 전문가 시스템에서의 규칙매독은 비교적 낮은 공정이지만 알고리즘의 응답시간은 실제공정과 부합되어야 한다.

전문가 시스템을 위한 실험은 전문가 시스템, 수치 알고리즘, man-machine 인터페이스의 세부분으로 나뉘어지며 구조도는 (그림5-1)과 같다.



(그림5-1). 전문가 시스템의 구조도.

전문가 시스템은 규칙기반 프러덕션 시스템인 OPS5로 구성된다. 수치알고리즘은 제어알고리즘과 동정알고리즘, 감시알고리즘의 세 형태로 구분되는데 제어알고리즘은 PID제어, 릴레이 제어, 자동 자기동조 PID제어이며 동정알고리즘은 kc- τ c estimator와 최소자승알고리즘이며 감시알고리즘은 제어기 출력으로부터 정적인 오차와 위험을 발견하고 경보해주는 알고리즘으로 C-언어와 Lisp언어로 구성되며, A/D, D/A 콘버터와 연결되어 수치적인 흐름으로부터 부호화된 정상적 신호를 추출해내는 필터모씨 사용된다. 또한 man-machine 인터페이스는 Lisp언어로 구성된다.

종래의 전문가 시스템은 실시간 제어에 매우 복잡하나 계획기능을 추가하여 이를 대체할 수 있다. 예를 들면 많은 순차적 요소를 갖는 제어기의 위상을 동조할 경우 우선 잠음수정 알고리즘이 릴레이 계수조정에 필요한 잠음정보를 수집한다. 정상상태인동음 결정하기 위해 탐지기(Detector)가 부착된다. PID 계수들은 진동파형으로부터 결정되고 PID 제어가 시작된다. 여기에서 법칙들은 그물와 하는 것이 당연하다. 따라서 순차적인 문제는 법칙들에 명시되어야 하나 실제적인 전문분야 지식들은 법칙들을 적용함에 따라 이미 존재하는 값들이 변화하기도 하는 단점이 있다. 또한, 추론장치에 있어 전문가 시스템은 주로 알고리즘에서 보내지는 데이터에 의해 구동되는 전향추진식 수론이나 진단문제와 같은 감시기능에서는 후향추진식 수론이 더 적합하고 시스템이 오퍼레이터로부터 공정지식을 얻으려고 할 때도 마찬가지이다.

구현의 다음 단계는 전문가 시스템을 하기 위한 견본 모델을 구성하는 작업으로 현재 수행중이며 앞으로 소개될 예정이다.

6. 참고문헌

1. K.E. Arzen, "Use of Expert Systems in Closed Loop Feedback Control" In Proc. ACC pp 140-145. 1986.
2. K.J. Astrom, J.J. Anton, and K.E. Arzen, "Expert Control" Automatica 22. pp 277-286. 1986.
3. K.J. Astrom and T. Hagglund, "Automatic Tuning of Simple Regulators" IFAC workshop on adaptive systems in Control and Signal Proc. PP 271-276, 1983.
4. K.J. Astrom and T. Hagglund, "Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margine" Automatica vol 20. pp 645-651. 1984.
5. L. Brown, R. Farrell, E. Kant and N. Martin: Programming Expert Systems in OPS5. (book) Addison-Wesley. 1985.
6. R. Daris and D. Lenat: Knowledge-Based Systems in Artificial Intelligence. (book) McGraw-Hill. 1982.
7. F. Hayes-Roth, D. Watermann and D. Lenat: Building Expert Systems. (book) Addison-Wesley. 1983.
8. R.L. Moore, L.B. Hawkinson, M.E. Levin and C.G. Knickerbocker "Expert Control," in Proc. ACC pp 385-387. 1985.
9. D.A. Watermann: A Guide to Expert Systems. (book) Addison-Wesley. 1986.
10. P.H. Winston and B.K.P. Horn: LISP(book) Addison-Wesley. 1984.
11. G. Steele Jr: Common LISP(book) Preference Manual. 1984.