

전문가 시스템을 이용한 모델 추종 시스템의 기준 모델 선정

문동욱^a, 황영문, 강영호, 이후민, 김낙교
 건국대학교 전기공학과

A Determination of the Reference Model for the Model Following System using an Expert System

Dong-Wook Moon^a, Young-Moon Hwang, Young-Ho Kang, Hoo-Min Lee, Lark-Kyo Kim
 Dept. of Electrical Engineering, Kon-Kuk University

Abstract

In modern control engineering, the model following system is a typical method. The model following system's performance is due to algorithm of control law, accuracy of modeling to the plant, and dynamics of the reference model. But the determination of the reference model depends on knowledge of an expert. Using an expert system, the determination method of the reference model was proposed in this paper. So, the reference model can be selected by user who has no knowledge of dynamics and parameters.

1. 서론

모델 추종 시스템의 기본 개념은 제어기를 통한 시스템이 사용자가 원하는 모델에 근사되도록 제어를 행하는 것이다. 따라서 모델 추종 시스템의 결과는 제어기의 성능과 선정된 기준 모델의 특성에 영향을 받게 된다. 즉, 적절치 못한 기준 모델은 제어계의 결과가 사용자가 원하는 특성과 차이나는 원인이다. 또한 대부분의 경우, 사용자가 원하는 설계 사양을 만족하는 기준 모델을 선정하는 것은 숙련된 설계자의 경험에 의존하고 있는 실정이다. 본 논문에서는 기준 모델을 제시해주는 전문가 시스템을 제안함으로써, 사용자가 시스템의 파라미터와 동특성에 대한 예비 지식없이도 간단하게 설계 사양을 지정하여 원하는 기준 모델을 선정할 수 있도록 하였다.

2. 기준 모델

2.1. 모델 추종 시스템에서의 기준 모델

모델 추종 시스템에서 기준 모델은 미지의 플랜트의 동특성을 식별하기 위한 신호로 사용되어, 플랜트의 정보를 얻는데 이용된다. 즉, 기준 모델과 플랜트 출력 사이의 추종 오

차에 관련된 정보는 기준 모델을 완벽하게 추종하는 제어 성능을 얻기 위해 제어기의 규칙을 어떻게 변화시켜야 할 지를 결정하는데 사용된다[11]. 예컨대 만약 추종 오차가 존재하지 않으면 적응 제어기의 파라미터들은 완전한 동조가 되었다고 볼 수 있으며, 반대로 추종 오차가 존재한다면 적응 제어기의 규칙은 동조될 필요가 있는 것이다.

플랜트에 대해 요구되는 제어 특성은 기준 모델로 표현하며, 제어기를 투입한 플랜트 응답이 기준 모델과 같은 응답이 되도록 하기 위해서는 속응성, 안정성, 정상 상태 특성 등의 설계 사양을 각각 정량화하고 지정하여 이를 만족하도록 제어기를 설계해야 한다[7].

2.2. 시스템의 동특성과 설계 사양

일반적으로 속응성과 안정도는 그림 2.2.1.에서와 같이 계단 응답 (step response) 파형의 시간 영역 해석과 주파수 영역 해석에 의해 지정할 수 있다. 동적 시스템의 시간 응답 특성을 표시하는 항목으로는 지연 시간 (delay time), 상승 시간 (rising time), 첨두 시간 (peak time), 최대 초과량 (maximum overshoot), 정착 시간 (settling time) 등이 있다. 또한 동적 시스템의 주파수 응답 특성을 표시하는 항목으로는 대역폭 (band width), 공진 첨두 주파수 (resonant peak frequency), 공진 첨두치 (resonant peak magnitude) 등이 있다[12, 13].

최대 초과량 M_r 은 순수한 안정도를 표현한다. 또한 상승 시간 t_r 과 지연 시간 t_d , 첨두 시간 t_p 은 보통 순수한 속응성을 표현한다. 정착 시간 t_s 은 속응성과 안정성의 양쪽에 모두 의존하는 값이다. 한편 주파수 응답에 대한 공진 첨두치 M_r 는 순수한 안정도를 표현하고, 공진 첨두 주파수 ω_r 와 대역폭 BW 은 속응성을 표현한다[7].

정상 특성의 지정은 계단 (step) 입력, 램프 (ramp) 입력 등을 받을 때의 정상 편차 ($t \rightarrow \infty$ 에서 잔류 편차) 를 규정하는 것이다. 이를 위해 위치 오차 상수, 속도 오차 상수, 가속도 오차 상수를 정의하게 된다[12, 13].

특별한 경우를 제외하고는 물리 시스템에서의 페루프 시스템 대부분이 감쇠진동 특성을 가진다. 따라서 가장 단순한 표현으로 다음의 전달함수로 표현되는 2 차 진동 시스템을 생각해볼 수 있으며, 이에 대한 해석적 결과는 이미 알려져 있다[11].

$$G_m(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

여기서 $K_p = \infty$ 의 조건을 만족하도록, 분자, 분모의 상수 항을 동가로 가정하였다. 식 (1) 의 2 차 진동 시스템은 2 개의 선택 가능한 파라미터, ζ 와 ω_n 를 결정함에 따라 2 개의 설계 사양을 만족하는 기준 모델을 구해낼 수 있다. 하지만 사용자가 3 개 이상의 설계 사양을 요구한다면 일반적으로 이를 만족시키는 2 차 진동 시스템을 구해낼 수는 없다. 사용자가 4 개의 설계 사양을 요구한다면 4 개의 파라미터를 가지는 시스템으로 2 차 진동계에 1 개의 영점과 1 개의 극을 추가한 모델을 가정해볼 수 있다.

$$G_m(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \cdot \frac{s + \sigma}{\sigma} \cdot \frac{\lambda}{s + \lambda} \quad (2)$$

$$= \frac{K_p \cdot \lambda}{\sigma} \cdot \frac{s + \sigma}{(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)(s + \lambda)}$$

이것은 4 개의 파라미터를 가지고 있기 때문에 4 항목의 설계 사양에 충분히 응용 가능하다고 예상할 수 있다. 하지만 이러한 3 차 시스템의 해석에서 대수적인 방법으로 4 가지의 특성 명세를 만족하는 $\zeta, \omega_n, \lambda, \sigma$ 를 직접 결정하는 것은 곤란하다. 왜냐하면, 이에 대한 방정식은 대수적 방법으로는 구할 수 없는 초월 방정식으로 표현되기 때문이다[7].

3. 제안하는 전문가 시스템

3.1. 전문가 시스템의 개요

본 논문에서는 4 개의 파라미터를 가지는 3 차 시스템에서 각 파라미터 값을 여러가지로 변화시키면서, 그에 따른 특성 명세를 데이터 베이스화 한 후, 사용자가 원하는 설계 사양에 근사적으로 가장 가까운 해를 찾아내는 전문가 시스템을 제안한다.

3.2. 제안하는 3 차 시스템의 해석

3.2.1. ω_n 에 대한 정규화

본 논문에서 제안하는 시스템은 2 차 진동계에 극점과 영점이 추가된 3 차 시스템이다.

$$G_m(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \cdot \frac{s + \sigma}{\sigma} \cdot \frac{\lambda}{s + \lambda} \quad (2)$$

시스템의 분모와 분자를 ω_n^2 으로 나누면 식은 다음과 같다.

$$G_m(s) = \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_n}\right)^2 + 2\zeta\left(\frac{s}{\omega_n}\right) + 1} \cdot \frac{\frac{s}{\omega_n} + \frac{\sigma}{\omega_n}}{\frac{\sigma}{\omega_n}} \cdot \frac{\frac{\lambda}{\omega_n}}{\frac{s}{\omega_n} + \frac{\lambda}{\omega_n}} \quad (3)$$

파라미터의 수를 줄이기 위해 ω_n 에 대한 정규화를 행하면 다음과 같다.

$$G_m'(s) = \frac{1}{s^2 + 2\zeta s + 1} \cdot \frac{s + \sigma'}{\sigma'} \cdot \frac{\lambda'}{s + \lambda'} \quad (4)$$

$$= \frac{1}{s^2 + 2\zeta s + 1} \cdot \frac{\frac{s}{\lambda'} + 1}{\frac{\sigma'}{\lambda'} + 1}$$

$$\sigma' = \frac{\sigma}{\omega_n}, \lambda' = \frac{\lambda}{\omega_n} \quad (5a, 5b)$$

또한 이때 특성 명세도 ω_n 에 관해 정규화되어, 시간 축은 ω_n 이 곱해지며, 주파수 축은 ω_n 이 나누어진다.

$$t_d' = t_d \cdot \omega_n, BW' = \frac{BW}{\omega_n}, K_p' = \frac{K_p}{\omega_n} \quad (6a, 6b, 6c)$$

3.3. 데이터 베이스의 구축

전문가 시스템을 구축하기 위해 다음과 같은 시스템에 대해서 파라미터 ζ, σ, λ 의 값을 변화시키면서 시스템의 동특성을 데이터 베이스화 하였다. 이 때 파라미터의 값은 다음의 범위에서 ζ 는 29 개를, σ, λ 는 101 개로 설정하였으며, 특성 명세로 지연 시간, 상승 시간, 침투 시간, 최대 초과량, 정착 시간, 대역폭, 공진 침투 주파수, 공진 침투치, 속도 오차 상수 등 9 개의 항목을 데이터 베이스화하였다.

$$G_m(s) = \frac{1}{s^2 + 2\zeta s + 1} \cdot \frac{\frac{s}{\lambda} + 1}{\frac{\sigma}{\lambda} + 1}$$

$$0 < \zeta \leq 1$$

$$0.01 \leq \sigma \leq 100$$

$$0.01 \leq \lambda \leq 100$$

3.4. 기준 모델을 구하는 알고리즘

3.4.1. 평가 함수에서 ω_n 의 소거

정규화의 과정에서 미지의 ω_n 이 포함되어 있으므로 이를 소거해야 평가 함수를 계산할 수가 있다. ω_n 을 소거하기 위해 다음의 두 가지 방법, 승제법과 역 대입법을 제안한다.

1) 승제법 (Multiplication and Division Method)

ω_n 을 포함하는 특성 항목끼리 곱하거나 나누면 쉽게 ω_n 을 소거할 수 있게 되며, 이때 부수적인 이득으로 항목의 수가 줄어든다.

예를 들어 사용자가 원하는 항목이 M_p, t_d, BW, K_p 였다고 한다면, M_p 를 제외한 다른 파라미터들은 정규화 과정에서 ω_n 의 항을 포함하게 된다.

$$t_d' = t_d \cdot \omega_n \quad (6a)$$

$$BW' = \frac{BW}{\omega_n} \quad (6b)$$

$$K_v' = \frac{K_v}{\omega_n} \quad (6c)$$

이 때, BW' 와 t_d' 를 곱하고 K_v' 와 t_d' 를 곱하면 ω_n 은 소거가 되는 것과 동시에 파라미터가 2 개로 줄어든다.

$$\alpha = BW' \cdot t_d' = BW \cdot t_d \quad (7a)$$

$$\beta = K_v' \cdot t_d' = K_v \cdot t_d \quad (7b)$$

이 방법은 손쉽게 ω_n 을 소거할 수 있으며 항목의 수가 줄어드는 장점이 있으나 특성 항목이 α, β 로 치환되므로 평가 함수가 α, β 의 식으로 전개되어야 하며, 선택된 특성 항목에 따라 기존의 평가 함수와 새로 전개되는 평가 함수가 동일한 성능 지표로 사용될 수 있음을 증명하는 것이 쉽지 않은 단점이 있다. 다음은 승제법에서 사용할 수 있는 평가 함수의 예다.

$$E = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \left(\frac{\alpha''}{\alpha} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\beta''}{\beta} - 1 \right)^2 \right\} \quad (8)$$

2) 역 대입법 (Inverse Substitution Method)

평가 함수로부터 ω_n 의 최적치를 계산하여 이를 다시 평가 함수에 대입하는 방법이다. 예를 들어, 사용자가 원하는 항목이 M_p, t_d, BW, K_v 였다고 한다면, 평가 함수는 다음으로 나타낼 수 있다.

$$E = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{BW'' \omega_n}{BW} - 1 \right)^2 + \left(\frac{K_v'' \omega_n}{K_v} - 1 \right)^2 + \left(\frac{t_d \omega_n}{t_d'} - 1 \right)^2 + \left(\frac{M_p''}{M_p} - 1 \right)^2 \right\} \quad (9a)$$

평가 함수를 ω_n 에 대하여 편미분하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial E}{\partial \omega_n} = \frac{BW''}{BW} \left(\frac{BW''}{BW} \omega_n - 1 \right) + \frac{K_v''}{K_v} \left(\frac{K_v''}{K_v} \omega_n - 1 \right) + \frac{t_d}{t_d'} \left(\frac{t_d}{t_d'} \omega_n - 1 \right) \quad (9b)$$

$\frac{\partial E}{\partial \omega_n} = 0$ 으로부터 ω_n 의 최적치를 구할 수 있다.

$$\omega_n = \frac{\frac{BW''}{BW} + \frac{K_v''}{K_v} + \frac{t_d}{t_d'}}{\left(\frac{BW''}{BW} \right)^2 + \left(\frac{K_v''}{K_v} \right)^2 + \left(\frac{t_d}{t_d'} \right)^2} \quad (10)$$

즉, 이 ω_n 값을 다시 평가 함수에 대입하면 ω_n 을 소거할 수 있다.

역 대입법은 평가 함수의 식이 변형되더라도 평가 함수로서의 성능 지표의 기준이 변하지 않는 장점이 있으나, 식이 다소 복잡해지며, 때문에 처리 계산 속도가 늦어지는 단점이 있다. 하지만 ω_n 을 바로 구할 수 있으며, 평가 함수의 정확성 때문에 빠른 처리 속도의 컴퓨터를 이용하는 경우에는 바람직한 방법이랄 수 있다. 다만 ω_n 을 풀어내기 위해서는 ω_n 의 차수를 고려하여 평가 함수를 선택해야 한다.

평가 함수를 잘못 선택하면 $\frac{\partial E}{\partial \omega_n} = 0$ 의 방정식은 대수적으

로 해를 구할 수 없는 3 차 이상의 방정식이 되기 때문이다.

4. 전문가 시스템의 구현과 결과

본 논문에서 제안한 전문가 시스템을 구축하기 위해 Pentium 75 컴퓨터 상에서 Quick Basic 4.5 를 근간으로 프로그래밍하였다. 데이터 베이스를 구축하는데 있어 구해야 하는 파라미터 쌍이 모두 295829 개이기 때문에 데이터 베이스를 구축하는 것에만 약 80 시간이 소요되었다. 그러나 구축된 데이터 베이스를 가지고 사용자의 요구 사항을 만족하는 기준 모델을 계산하는 시간은 불과 1 분에서 2 분 정도에 해당하는 매우 빠른 속도로 데이터 검색을 행하였다. 실제 사양으로 입력받은 특성 항목은 M_p, t_d, BW, K_v 였으며 데이터 검색은 역 대입법을 사용하여 다음과 같은 순서로 행해졌다.

i) 실제 사양의 M_p 를 일정 범위 안에서 만족하는 모델의 파라미터 값과 특성 명세 값들을 데이터 베이스에서 찾아낸다.

ii) 해당 모델의 $BW'', t_d'', K_v'', M_p''$ 의 값으로부터 평가 함수 E 를 최소로 하는 $\zeta'', \sigma'', \lambda''$ 를 구한다.

$$E = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{BW'' \omega_n}{BW} - 1 \right)^2 + \left(\frac{K_v'' \omega_n}{K_v} - 1 \right)^2 + \left(\frac{t_d \omega_n}{t_d'} - 1 \right)^2 + \left(\frac{M_p''}{M_p} - 1 \right)^2 \right\}$$

$$\omega_n = \frac{\frac{BW''}{BW} + \frac{K_v''}{K_v} + \frac{t_d}{t_d'}}{\left(\frac{BW''}{BW} \right)^2 + \left(\frac{K_v''}{K_v} \right)^2 + \left(\frac{t_d}{t_d'} \right)^2}$$

iii) ω_n 과 ζ, σ, λ 을 구한다.

$$\zeta = \zeta'', \sigma = \sigma'' \cdot \omega_n, \lambda = \lambda'' \cdot \omega_n$$

원하는 실제 사양으로 $M_p = 20(\%)$, $t_d = 0.012(s)$, $BW = 100(\text{rad/s})$, $K_v = 200(\text{rad/s})$ 을 입력하였다. 표 1 은 본 논문에서 제안한 전문가 시스템이 찾아낸 결과이며, 동일한 실제 사양에 대해 수작업 (도표화 방법 [7]) 으로 찾아낸 결과와 비교하여 매우 정확한 기준 모델을 선정하는 것을 알 수 있다.

표. 전문가 시스템의 결과 비교

	실제 사양	전문가 시스템	도표화방법
ζ		0.61557221	0.70710678
σ		52.3080531	36.4
λ		361.883312	286
ω_n		57.3546397	52
t_d	0.012 (s)	0.0116008	0.0114517
BW	100 (rad/s)	99.4398	101.7132
K_v	200 (rad/s)	195.6458	310.5214
M_p	20 (%)	20.146835	20.790947
E		0.0006224	0.1547801

5. 결론

본 논문에서는 설계자가 기준 모델의 파라미터와 동특성에 관한 사전 지식없이도 간단하게 속응성, 안정도, 정상 특성과 관련된 설계 사양만을 지정하여 기준 모델을 선정할 수 있게 해주는 전문가 시스템을 제안하였다. 그 예로서 설계 사양으로 M_p , t_d , BW , K , 의 값을 입력받아 기준 모델을 찾아내는 전문가 시스템을 제시하였으며, 전문가 시스템은 매우 만족스러운 결과를 나타내었다.

본 논문의 전문가 시스템을 활용할 수 있는 범위는 대단히 넓다고 볼 수 있다. 플랜트 인식 및 제어를 포함하여 지능형 전문가 시스템을 구축하면, 완전한 자동 제어 시스템의 구축도 가능하며, 모델 추종 시스템이 아니라더라도 본 논문에서 분석된 데이터 베이스를 활용한다면 다른 방식의 제어기 설계에도 도움이 될 것이다.

참고 문헌

[1] K. J. Astrom and T. Hagglund, Automatic Tuning of PID Controllers. Instrument Society of America, 1988, pp. 4-28.

[2] V. I. Utkin, "Variable Structure Systems with Sliding Modes", IEEE Trans. Automatic Control, vol. AC-22, no. 2, pp. 212-222, 1977.

[3] I. D. Landau, System Identification and Control Design. Prentice Hall, 1990, pp. 121-177, 179-211.

[4] R. Isermann, K. H. Lechmann, and D. Matko, Adaptive Control Systems, Prentice Hall, 1992.

[5] S. Sagara, Z. J. Yang, and Wada, "Recursive Identification Algorithms for Continuous System using Adaptive Procedure", Int. J. Control, vol. 53, no.2, pp. 391-409, 1991.

[6] Narendra, K. S. and Annaswamy, A. M., Stable adaptive systems, Prentice Hall, 1989.

[7] 市川邦彦, 制御系設計法 [1], 計測と制御 vol. 23, no. 6, 1984.

[8] K. J. Astrom, "Theory and Applications of Adaptive Control" Automatica, vol. 19, no. 5, pp. 471-486, 1993.

[9] K. J. Astrom and B. Wittenmark, Adaptive Control, Addison-Wesley, 1989, pp. 58-85, 328-340.

[10] S. Sastry and M. Bodson, Adaptive Control: Stability, Convergence, and Robustness, Prentice Hall, Inc., 1989.

[11] 손재현, "동적 시스템을 위한 모델 기준 적응 퍼지 제어기의 설계", 건국대학교 대학원 박사학위논문, 1995.

[12] 남문현, 이상호, 남부희, 제어 시스템 공학, 자유 아카데미, 1989.

[13] G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini, Feedback Control of Dynamic Systems, Addison-Wesley, 1994.

[14] Katsuhiko Ogata, Modern Control Engineering, Prentice Hall, Inc., 1993.

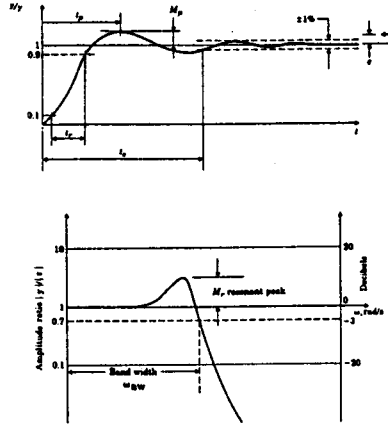


그림 2.2.1. 동적 시스템의 시간 응답 특성과 주파수 응답 특성

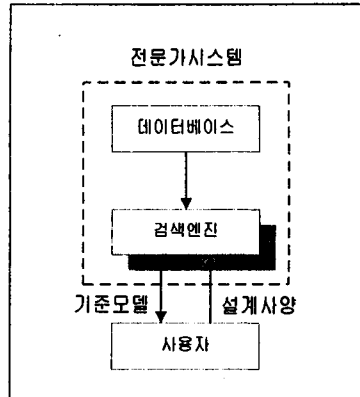


그림 4.1.1. 전문가 시스템의 개요

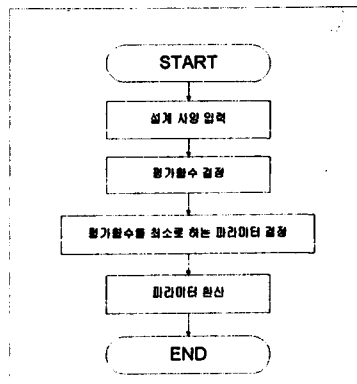


그림 4.4.2. 검색 엔진의 Flowchart.