

e-Δe 위상평면을 이용한 이중 제어규칙을 갖는 퍼지 제어기 설계

박광목*, 신위재**

경남대학교 전기전자공학부

Tel) 0551-249-2837, Fax) 0551-249-2839

Design of Fuzzy Controller with dual control rules using e-Δe phase plane

Kwang-Muk Park, Wee-Jae Shin

Faculty of Electrical and Electronic Engineering, Kyungnam University

*mooktype@hanmail.net, **cwee@kyungnam.ac.kr

Abstract

In this paper we analyzed each region of specific points and e-Δe phase plane in order to make fuzzy rule base. After we composed the fuzzy control rules which can decrease rise time, delay time, maximum overshoot than basic fuzzy control rules. The composed method are converged more rapidly than single rule base in convergence region. Proposed method is alternately use at specific points of e-Δe phase plane with two fuzzy control rules, that is one control rule occuring the steady state error used in transient region and another fuzzy control rule use to decrease the steady state error and rapidly converge at the convergence region. Two fuzzy control rules in the e-Δe phase plane decide the change time according to response characteristics of plants. As the results of simulation through the second order plant and the delay time plan, Proposed dual fuzzy control rules get the good response compare with the basic fuzzy control rule.

서론

본 논문에서는 상승시간과 정정시간 및 오버슈트를 감소시키기 위해서 두 개의 퍼지 제어규칙을 만드는데 있어, 플랜트의 특성에 얽매이지 않고 보편적으로 사용할 수 있도록 e-Δe 위상평면에서 특징점을 찾고 두 개의 퍼지 제어규칙을 교체시켜 제어 성능을 향상시키는 방법을 연구하였다. 기본 퍼지 제어규칙과 제안한 방법으로 구성된 퍼지 제어규칙을 플랜트에 각각 적용하여 e-Δe 위상평면에서의 특징점과 특징영역에서의 규칙 변화에 대한 효과를 비교하였고 이중 제어규칙을 적용했을 경우와 기본 퍼지 제어규칙을 적용했을 경우를 비교하여 이중 제어규칙의 성능을 확인하였다.

1. 기본 퍼지 제어규칙

제어규칙을 작성하기 위해 플랜트의 스텝응답

에서의 특징점으로부터 오차(e)와 오차 변화율(Δe)의 위상평면에서 특징점과 특징영역을 사용하여 기본 퍼지 제어규칙을 구할 수 있고 169개의 규칙을 나타내면 Table 1과 같다.^[1,2]

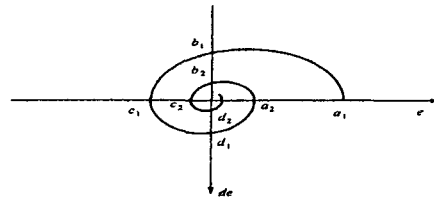


Fig. 1. e-Δe 위상평면. 제칙의 특징점

Table 1. 기본 퍼지 제어규칙에서 확장된 169개의 퍼지 제어규칙

| e | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |
|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Δe | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |
| NB | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |
| NM | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |
| NS | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |
| ZE | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |
| PS | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |
| PM | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |
| PB | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |

2. 퍼지 제어규칙

본 논문에서 제안된 두 개의 제어규칙 중 과도 영역에 중점을 둔 제어규칙인 Rule1은 상승시간

과 최대오버슈트, 언더슈트를 감소시키기 위한 규칙이고, 수렴영역에 중점을 둔 퍼지 제어규칙인 Rule2는 설정치에 더 빨리 도달하게 하는 제어규칙이다.

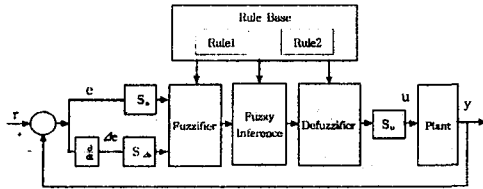


Fig. 2. 이중 제어규칙을 갖는 퍼지 제어기

Fig. 3은 이상적인 e 와 Δe 의 위상평면 궤적이다. 두 개의 제어규칙을 결합하면 이상적인 궤적에 가깝게 될 수 있다.

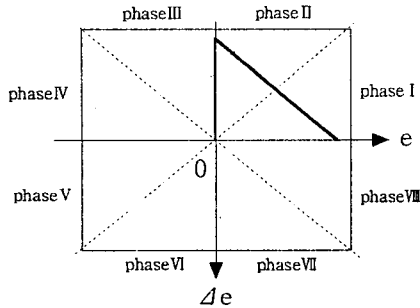


Fig. 3. e - Δe 위상평면에서의 이상적인 궤적

Rule1은 두 가지로 작성할 수 있다. 첫째는 플랜트가 일반적인 스텝응답 특성을 나타낼 경우, 즉 언더슈트가 발생할 경우에는 Rule1이 Table 2와 같이 작성되고, e - Δe 위상평면의 특징점 a2에서 Rule2가 적용된다.

Table 2. Rule1

| e Δe | NB | NME | NM | NMS | NS | NVS | ZE | PVS | PS | PMS | PM | PME | PB |
|-------------------|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| NB | NB | NME | NM | NM | NME | NB | NB | NB | NME | NM | PM | PME | PB |
| NME | NB | NME | NM | NMS | NM | NME | NB | NM | NMS | PM | PME | PB | PB |
| NM | NB | NME | NB | NB | NB | NM | NB | NB | NB | PB | PME | PB | PB |
| NMS | NB | NME | NM | NB | NB | NMS | NB | NB | NB | PM | PME | PB | PB |
| NS | NB | NME | NM | NMS | NB | NB | NS | NB | NB | PMS | PM | PME | PB |
| NVS | NB | NME | NM | NMS | NS | NB | NVS | NB | PS | PMS | PM | PME | PB |
| ZE | NB | NME | NM | NMS | NS | NVS | ZE | PVS | PS | PMS | PM | PME | PB |
| PVS | NB | NME | NM | NMS | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PME | PB |
| PS | NB | NME | NM | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PME | PB |
| PMS | NB | NME | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PME | PB |
| PM | NB | NME | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PME | PB |
| PME | NB | NME | NM | PMS | PM | PB | PB | PM | PMS | PM | PME | PB | PB |
| PB | NB | NME | NM | PM | PME | PB | PB | PME | PM | PM | PME | PB | PB |

둘째로, 플랜트가 지연요소를 포함하는 경우처럼 언더슈트가 발생하지 않는 경우에는 Rule1이 Table 3과 같이 작성되고, e - Δe 위상평면의 특

징점 c1에서 Rule2를 적용한다.

Table 3. Rule1

| e Δe | NB | NME | NM | NMS | NS | NVS | ZE | PVS | PS | PMS | PM | PME | PB |
|-------------------|----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| NB | NB | NME | NM | NM | NME | NB | NB | NB | NME | NM | PM | PME | PB |
| NME | NB | NME | NM | NMS | NM | NB | NB | NB | NM | NMS | PM | PME | PB |
| NM | NB | NME | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB | PB | PB | PB |
| NMS | NB | NME | NM | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB | PB | PB | PB |
| NS | NB | NME | NM | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB | PB | PB | PB |
| NVS | NB | NME | NM | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB | PB | PB | PB |
| ZE | NB | NME | NM | NB | NB | NB | ZE | PVS | PS | PMS | PM | PME | PB |
| PVS | NB | NME | NM | NMS | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PME | PB |
| PS | NB | NME | NM | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PME | PB |
| PMS | NB | NME | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PME | PB |
| PM | NB | NME | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PB | PME | PB |
| PME | NB | NME | NM | PMS | PM | PB | PB | PM | PMS | PM | PME | PB | PB |
| PB | NB | NME | NM | PM | PME | PB | PB | PME | PM | PM | PME | PB | PB |

주의할 것은 Rule1은 대칭성이 없으므로 현재의 설정치 보다 낮은 값의 설정치를 위해서는 제시된 Rule1을 대칭되게 작성하여 적용하면 된다. 하지만 Rule2는 대칭을 이루고 있으므로 상관없다.

따라서 Rule2는 Table 4와 같다.

Table 4. Rule2

| e Δe | NB | NME | NM | NMS | NS | NVS | ZE | PVS | PS | PMS | PM | PME | PB |
|-------------------|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|----|
| NB | NB | NME | NM | NM | NME | NB | NB | NB | NME | NM | PM | PME | PB |
| NME | NB | NME | NM | NMS | NM | NB | NME | NB | NM | NMS | PM | PME | PB |
| NM | NB | NME | NM | NS | NMS | NME | NM | NME | NMS | NS | PM | PME | PB |
| NMS | NB | NME | NM | NB | NMS | NM | NMS | NM | NMS | NB | PM | PME | PB |
| NS | NB | NME | NM | NMS | NB | NMS | NS | NMS | NB | PMS | PM | PME | PB |
| NVS | NB | NME | NM | NMS | NS | NB | NVS | NB | PS | PMS | PM | PME | PB |
| ZE | NB | NME | NM | NMS | NS | NVS | ZE | PVS | PS | PMS | PM | PME | PB |
| PVS | NB | NME | NM | NMS | NS | PB | PVS | PB | PS | PMS | PM | PME | PB |
| PS | NB | NME | NM | NMS | PB | PMS | PS | PMS | PB | PMS | PM | PME | PB |
| PMS | NB | NME | NM | PB | PMS | PM | PMS | PM | PMS | PB | PM | PME | PB |
| PM | NB | NME | NM | PS | PMS | PME | PM | PME | PMS | PS | PM | PME | PB |
| PME | NB | NME | NM | PMS | PM | PB | PME | PB | PM | PMS | PM | PME | PB |
| PB | NB | NME | NM | PM | PME | PB | PB | PB | PME | PM | PM | PME | PB |

각 특징점에서 제어규칙이 Rule2로 교체되어 적용되는 부분은 e 와 Δe 의 값이 작은 부분이므로 Rule2를 ZOOM OUT시켜서 Rule1의 특정영역, 즉 정상상태에 큰 영향을 미치는 영역으로 교체되어 적용된다.^[3]

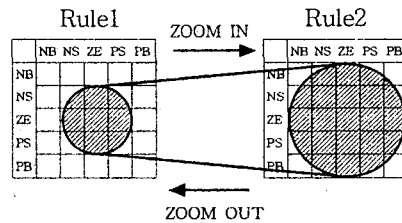


Fig. 4. Zoom-in/Zoom-out Method

3. 모의 실험 및 고찰

3.1 2차 플랜트에 적용한 경우

Rule2의 적용시점을 e-Δe 위상평면에서 a2로 해야할 경우의 예이다. 다음의 2차 플랜트를

$$G(s) = \frac{1.2033 \times 10^8}{s^2 + 2.9627 \times 10^3 s + 6.5775 \times 10^6} \quad (1)$$

샘플링 시간을 0.2ms로 이산화하여 차분방정식을 구한다.^[4]

$$y(k) = 1.39711 y(k-1) - 0.538894 y(k-2) + 2.59383 u(k-1) \quad (2)$$

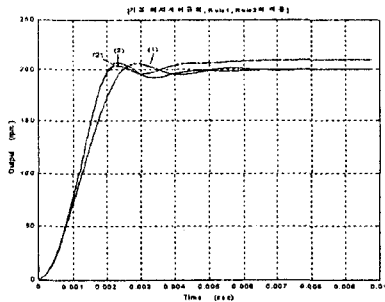


Fig. 5. (1) 기본 퍼지 제어규칙을 적용했을 경우
(2) Rule1을 적용했을 경우
(3) Rule2를 적용했을 경우

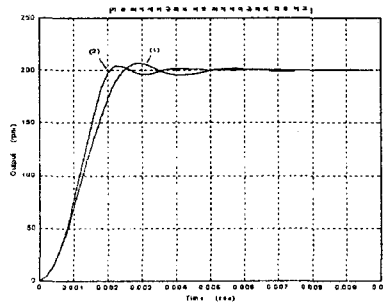


Fig. 6. 기본 퍼지 제어규칙(1)과 이중 퍼지 제어규칙(2)를 적용한 경우의 플랜트 응답 비교

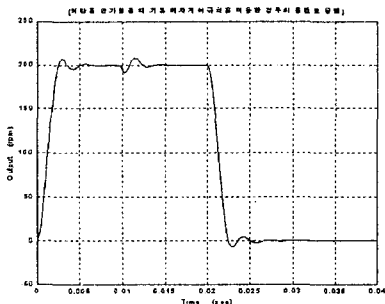


Fig. 7. 기본 퍼지 제어규칙을 플랜트에 적용하고 0.01 sec에 7rpm 외란을 가했을 경우의 응답특성

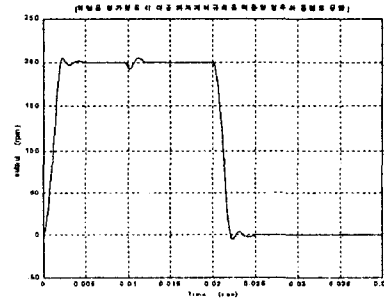


Fig. 8. 이중 퍼지 제어규칙을 플랜트에 적용하고 0.01 sec에 7rpm 외란을 가했을 경우의 응답특성
Table 5. 성능지수를 통한 응답특성 비교

| | 지연 시간 | 상승 시간 | 정정 시간 | 최대 오버슈트 | 최대 언더슈트 |
|------------|-------|-------|-------------|-------------------|---------|
| 기본 퍼지 제어규칙 | 1.3ms | 1.8ms | 2.3ms | 3.278% | 2.372% |
| Rule1 | 1.2ms | 1.5ms | ∞ *1.9ms | 5.264% *2.196% | 1.964% |
| Rule2 | 1.2ms | 1.5ms | 1.9ms | 3.831% | 3.890% |
| 이중 퍼지 제어규칙 | 1.2ms | 1.5ms | 1.9ms | 2.196% | 1.964% |

* 과도영역에서의 성능지수 값

Table 6. 외란 인가시 수렴시간 비교

| 적용된 제어규칙 | 외란 인가 시 수렴시간 |
|------------|--------------|
| 기본 퍼지 제어규칙 | 7.8ms |
| 이중 퍼지 제어규칙 | 4.4ms |

3.2 1차 지연 플랜트에 적용한 경우

Rule2의 적용시점을 c1으로 해야 할 경우의 예이다. 다음의 1차 지연 플랜트를

$$G(s) = \frac{0.15e^{-0.45s}}{s+0.15} \quad (3)$$

샘플링 시간을 1ms로 이산화하여 차분방정식을 구한다.^[4]

$$y(k) = 0.8607 y(k-1) - 0.0792 u(k-1) + 0.0601 u(k-2) \quad (4)$$

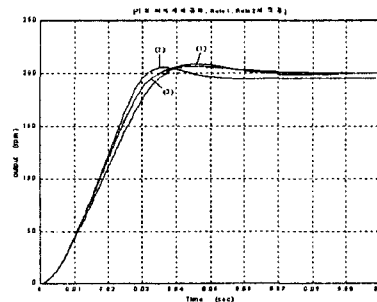


Fig. 9. (1) 기본 퍼지 제어규칙을 적용했을 경우
(2) Rule1을 적용했을 경우
(3) Rule2를 적용했을 경우

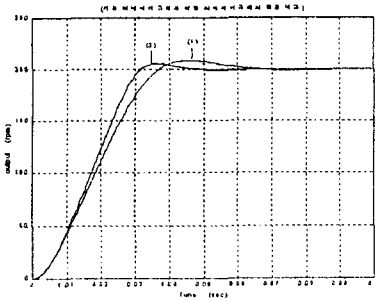


Fig. 10. 기본 퍼지 제어규칙(1)과 이중 퍼지 제어규칙(2)를 적용한 경우의 플랜트 응답 비교

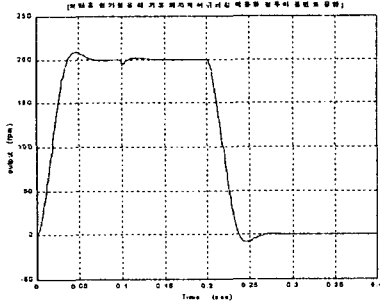


Fig. 11. 기본 퍼지 제어규칙을 플랜트에 적용하고 0.1 sec에 7rpm 외란을 가했을 경우의 응답 특성

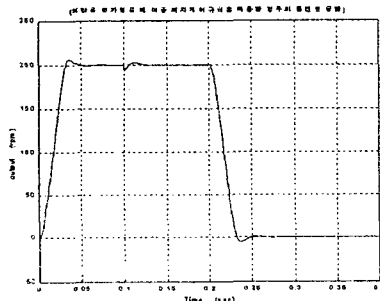


Fig. 12. 이중 퍼지 제어규칙을 플랜트에 적용하고 0.1 sec에 7rpm 외란을 가했을 경우의 응답 특성

Table 7. 성능지수를 통한 응답특성 비교

| | 지연 시간 | 상승 시간 | 정정 시간 | 최대 오버 슈트 |
|-----------|--------|--------|--------|----------|
| 기본퍼지 제어규칙 | 18.5ms | 24.5ms | 33.5ms | 4.299% |
| Rule1 | 17.5ms | 21ms | 29ms | 2.656% |
| Rule2 | 17.5ms | 22.5ms | 31ms | 3.109% |
| 이중퍼지 제어규칙 | 17.5ms | 21ms | 29ms | 2.656% |

Table 8. 외란 인가시 수렴 시간 비교

| 적용된 제어규칙 | 외란 인가 시 수렴시간 |
|------------|--------------|
| 기본 퍼지 제어규칙 | 65ms |
| 이중 퍼지 제어규칙 | 45ms |

결론

본 논문에서는 스텝응답의 특징점과 $e-\Delta e$ 위상평면의 각 영역을 분석하여 기본 퍼지 제어규칙보다 과도영역에서 상승시간, 지연시간, 최대 오버슈트 모두를 감소시킬 수 있는 퍼지 제어규칙과 수렴영역에서 더 빨리 수렴하는 퍼지 제어규칙을 작성하고 이러한 두 가지 퍼지 제어규칙을 $e-\Delta e$ 위상평면의 적절한 특징점에서 번갈아 사용하는 방법을 제안하였다. 모의 실험으로 2차 플랜트와 시간 지연을 갖는 1차 플랜트를 사용하여 기본 퍼지 제어규칙과 이중 퍼지 제어규칙을 적용하여 응답특성을 비교하여 제안한 이중 퍼지 제어규칙의 성능을 입증하였다. 과도영역에 적용되는 퍼지 제어규칙(Rule1)의 과도영역 특성을 그대로 살리면서 수렴영역에서의 Rule1의 좋지 않은 특성을 버리고 Rule2를 적용함으로써 수렴영역에서 Rule2의 특성을 가지는 결과를 얻었다. 또한 퍼지 제어기의 외란에 대한 특성을 알아보기 위해 퍼지 제어규칙과 이중 퍼지 제어규칙을 각각의 플랜트에 적용하여 외란에 대한 응답 특성을 비교하였다. 외란의 영향에 대해 이중 퍼지 제어규칙이 더 빨리 정상 상태로 수렴하는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] Ronald R. Yager, Dimitar P. Filev, "Essentials of Fuzzy Modeling and Control", John Wiley & Sons, Inc., pp.109-202, 1999.
- [2] E. H. Mamdani and S. Assilian, "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller", Int. J. Man-Machine Studies, Vol. 7, No. 1, 1975.
- [3] 김창균, 이중희, 변중남, 윤명중, "퍼지 논리 제어기를 이용한 BLDD 모터의 고정밀 속도 제어에 관한 연구", Proc. of KFIS Spring Conf., Vol. 5, Number 1, pp.78-82, 1995.
- [4] K. J. Astrom, B. Wittenmark : "Computer Controlled Systems Theory and Design Control", Prentice-Hall, pp.1-156, 1984.