

퍼지PI scaling factor의 분석적인 유도방법에 관한 연구

조정민*^o, 전기영*, 이승환**^o, 오봉환[§], 이훈구^{§ §}, 한경희*
명지대학교*, 대덕대학**, 명지전문대학[§], 용인송담대학^{§ §}

A study on an Analytical Approach to the Derivation of Fuzzy PI Scaling Factor

Jeong-Min Jho*^o, Kee-Young Jun*, Seung-Hwan Lee**^o, Bong-Hwan Oh[§]
Hoon-Goo Lee^{§ §}, Kyung-Hee Han*

Myongji Univ*., DaeDuk College**, Myongji College[§], Yongin SongDam College^{§ §}

ABSTRACT

Fuzzy logic control(FLC) has been studied extensively and has been applied in various applications. The most popular control strategy takes the Fuzzy Proportional-Integral(FPI) form. While systematic methods have been developed to derive the fuzzy rules and membership functions, the choice of the scaling factors remains an open problem. In this paper, an analytical FPI scaling factor determining method is derived, based on the functional equivalence of the PI and FPI controllers. Simulations have been carried out with a brushless DC motor drive system as test-bed, the obtained results have verified that the derived method is applicable to both the initial choice and further tuning of the FPI scaling factors.

1. 서론

퍼지로직제어는 다양한 응용장비에 적용되어져 왔다. 표준 퍼지로직제어기(FLC)는 일반적으로 주어진 기능을 처리할 수 있도록 제어동작을 명기한 퍼지 파라미터 세트로 구성되어있다. 따라서, FLC를 디자인하기 위한 핵심 문제는 시스템 성능을 극대화하도록 FLC의 파라미터를 결정하는 것이다. 실제 디자인에 있어서, 주된 퍼지 파라미터는 퍼지룰과 퍼지 멤버쉽함수 그리고 퍼지 입력과 출력의 scaling factor들로 구성된다.

과거에 FLC는 이러한 파라미터를 디자인하기 위한 조직적이고 객관적인 절차의 부족 때문에 경시되어져 왔다. 그래서 이런 파라미터들을 조직적으

로 결정하는 방법이 오랫동안 흥미 있는 연구 논제로 되어져 왔다.

본 연구에서는 시스템 전달함수를 이용하여 얻을 수 있는 PI제어기의 상수와 FPI scaling factor와의 등가성을 고려하여, FPI scaling factor의 범위를 분석적으로 구하는 방법을 고찰하였다. 내용구성은 다음과 같다. PI와 FPI제어기에 대한 요약 설명 후, PI와 FPI제어기에 대한 등가성을 기초로, FPI scaling factor를 유도하였다. 그리고, 유도된 공식으로 시뮬레이션을 행하여 공식의 적절함과 시스템 성능에 대한 scaling factor의 영향력을 확인하였다. 끝으로 제안된 공식을 기초로 하는 튜닝기법과 시스템 응답에 대하여 분석한 제어방법을 공식화하였다.

2. PI 와 FPI 제어

2.1 PI 제어기 구조

기존의 PI 제어알고리즘은 다음과 같은 이산 시간형태를 갖는다.

$$PI: u(k+1) = u(k) + \Delta u(k+1) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta u(k+1) &= K_p \Delta e(k) + K_i T_c e(k) \\ &= T_c [K_p \Delta e(k) / T_c + K_i e(k)] \quad (2) \end{aligned}$$

$e(k) = sv - pv$, sv 는 k 번째 샘플링 시간에서 설정점을 가리키고 pv 는 k 번째 샘플링 시간에서 프로세서의 출력값이다.

$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$ 는 샘플링타임 T_c 에서 오차의 변화분을 나타낸다.

$u(k)$ 는 제어신호이고 $\Delta u(k+1)$ 는 $u(k)$ 의 증가분이다. 그리고 K_p, K_i 는 각각 비례와 적분 계인이다.

2.2 Fuzzy PI 제어기 구조

위의 $e(k)$ 와 $\Delta e(k)$ 를 퍼지 변수로 이용하면, 다음과 같은 퍼지 제어 알고리즘으로 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{FPI} : u(k+1) &= u(k) + \Delta u(k+1) \\ &= u(k) + K_{cu} T_c CU(k+1) \end{aligned} \quad (3)$$

$$CU(k+1) = f[K_e e(k), K_{ce} \Delta e(k)] \quad (4)$$

여기에서, f 는 퍼지 알고리즘으로부터 유도된 퍼지함수를 나타낸다. 그리고 K_e, K_{ce}, K_{cu} 는 각각 오차, 오차의 변화, 출력 상승분에 대한 FPI scaling factors이다.

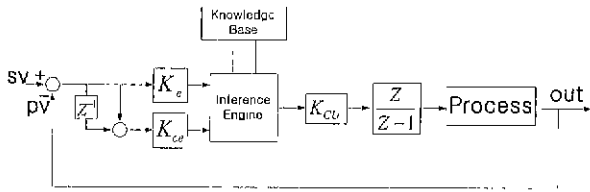


그림 1. 퍼지 PI 제어 구조
Fig. 1 Fuzzy PI control scheme

3. FPI 속도 제어기 디자인과 Scaling Factors 유도

전기적인 구동장치에 대한 퍼지 응용 장치는 5개나 7개의 퍼지 언어 변수이면 양호한 특성을 얻을 수 있다.[1] 따라서 스텝 변화에 따른 동적인 속도응답의 분석을 통하여 얻은 제어 규칙 디자인에 대하여, 7가지 퍼지 언어규칙 테이블은 표 1과 같이 구성하였다.

표1. FPI 제어를 위한 7가지 언어규칙
Table 1. A 7-term rule table for FPI controller

		E						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
CE	NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZO
	NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	PS
	NS	NB	NB	NS	NS	ZO	PS	PM
	ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PB	PB
	PM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
	PB	ZO	PS	PS	PM	PM	PB	PB

퍼지 제어를 결정하려면, 언어 세트인 각각의 라벨에 해당하는 멤버십 함수가 결정되어야만 한

다. 그리고 이를 간소화하기 위하여, 이등변 삼각형 함수를 채택하였다. 그림 2와 같이 입력과 출력 변수는 모두 같은 MF 정의를 공유하고 있다. 본 연구에서는 입력과 출력 변수들에 대하여 $[-3, 3]$ 으로 설정하였다.

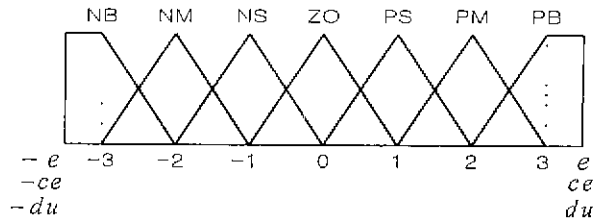


그림 2. FPI 입력력 변수를 위한 MF정의
Fig. 2 MF definition for FPI input and output variables

를 베이스 테이블, 양자화 레벨 수 7개, MF 매트릭스 표 1, Mamdani의 max-min 추론 방법 그리고, 비퍼지화에서 무게 중심법을 사용하면 다음과 같은 테이블을 구성할 수 있다.

표2. 7단계의 룩업 테이블
Table 2. A 7-level MF matrix for the fuzzy variables

		EQ						
		-3	-2	-1	0	1	2	3
CEQ	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-1	0
	-2	-3	-3	-3	-2	-1	0	1
	-1	-2	-2	-1	-1	0	1	1
	0	-2	-1	-1	0	1	1	2
	1	-1	-1	0	1	2	2	2
	2	-1	0	1	2	3	3	3
	3	0	1	2	3	3	3	3

표 2에서 CU와 EQ, CEQ사이의 관계가 비선형적임을 알 수 있다.

$$CU = \Phi(EQ, CEQ) \quad (5)$$

비록 이러한 비선형 함수 $\Phi(EQ, CEQ)$ 를 정확하게 표현하는 것은 어렵지만, $\Phi(EQ, CEQ)$ 가 다음의 범위를 갖는다는 것을 알 수 있다.

$$\left(\frac{EQ + CEQ}{2} \right) \leq \Phi(EQ, CEQ) \leq (EQ + CEQ) \quad (6)$$

만일, 여기에서 양자화 오차와 포화 영향을 무시한다면, 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$E = K_e e(k) \quad (7)$$

$$CE = K_{ce} \Delta e(k) \quad (8)$$

식(6)을 치환하기 위하여 식(3),(5),(7),(8)을 이용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$T_c K_{cu} \left(\frac{K_e e(k) + K_{ce} \Delta e(k)}{2} \right) \leq \Delta u(k+1) \quad \&$$

$$\Delta u(k+1) \leq T_c K_{cu} [K_e e(k) + K_{ce} \Delta e(k)] \quad (9)$$

일반적인 PI 제어기의 $\Delta u(k+1)$ 을 FPI제어기의 값으로 가정하고, 식(9)를 치환하기 위해 식(2)를 이용하면, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$T_c K_{cu} \left(\frac{K_e e(k) + K_{ce} \Delta e(k)}{2} \right) \leq T_c K_i e(k) + K_p \Delta e(k)$$

$$T_c K_i e(k) + K_p \Delta e(k) \leq T_c K_{cu} [K_e e(k) + K_{ce} \Delta e(k)]$$

변수 $e(k)$ 와 $\Delta e(k)$ 와 관련된 계수를 비교하면, FPI scaling factor와 PI 이득 사이의 관계가 다음과 같은 형태로 얻어질 수 있다.

$$K_i \leq K_e K_{cu} \leq 2K_i$$

$$K_p / T_c \leq K_{ce} K_{cu} \leq 2K_p / T_c \quad (10)$$

여기에서 PI 이득값은 일반적인 전달함수를 이용하여 조직적으로 선택되어질 수 있기 때문에, K_p 와 K_i 를 알고 있다고 가정하는 것은 타당하다. 따라서 BLDC모터 구동 시스템에 대한 PI 제어기의 이득 설정을 다음과 같이 채택하였다.[2]

$$K_p = \frac{J_M \cdot \omega_{sc}}{K_T}; \quad K_i = K_p \cdot \omega_{pr} \quad (11)$$

여기에서, ω_{pr} , ω_{sc} , J_M , K_T 는 각각 PI 절점각 주파수, PI속도제어제의 교차각 주파수, 기계적 관성, 서보 모터의 토크 계수이다.

K_p 와 K_i 값들이 주어졌다면, 식(10)을 적용하여 이득값을 결정하기 위해서, 3개의 scaling factor중에서 하나의 값을 결정하는 것이 필요하다. 그 다음으로 식(10)을 이용하여 K_e, K_{ce}, K_{cu} 값들을 계산할 수 있다.

식(10)은 본래 근사식이므로, 초기 선택을 위한 대략적인 범위가 된다. 실제의 경우에서, scaling factor의 올바른 범위는 실험을 통하여 확인될 필요가 있다. 일반적으로 scaling factor의 초기값은

식(10)에 의하여 정할 수 있다.

4. FPI Scaling Factors 와 시스템 응답에 관한 시뮬레이션 고찰

그림 3은 BLDC 구동 장치의 블록 다이어그램이다. 이때 제어 시스템은 FPI 속도 제어기와 전류 제어 루프를 기초로 한 벡터 제어로 구성되었고, 제어 시스템은 3개의 subsystem 즉, 정지형 컨버터, BLDC모터, 그리고 구동용 기계적 부하로 구성되었다.

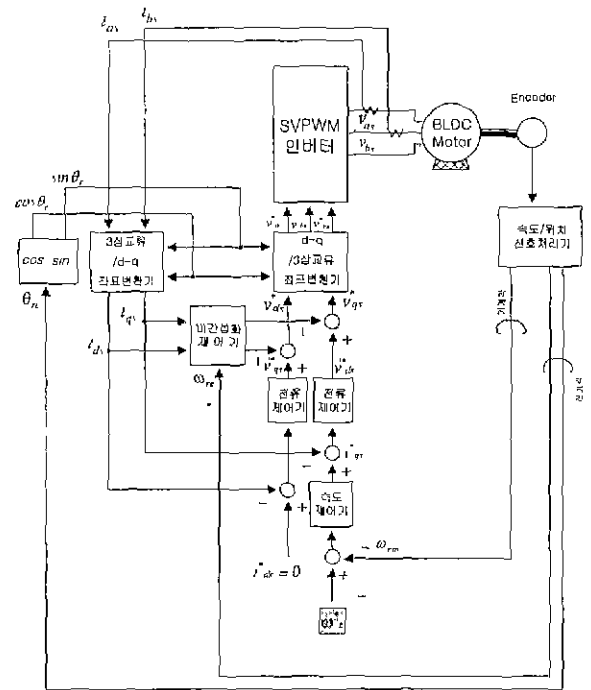


그림 3. BLDC모터의 전체 제어 구성
Fig. 3 Overall system control scheme of BLDC motor

BLDC 구동 장치가 다음과 같은 파라미터를 갖을 경우에

$$K_T = 0.1175 \text{ V} \cdot \text{s/rad}, \quad J_M = 0.32 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2,$$

$$\omega_{sc} = 200 \text{ rad/s}, \quad \omega_{pr} = 40 \text{ rad/s} (= \omega_{sc}/5)$$

식(11)로 설정한 PI이득으로부터, $K_i = 2.265$, $K_p = 0.056$ 을 얻을 수 있다. FPI scaling factor는 초기에 다음과 같은 관계로 설정 될 수 있다.

$$2.265 < K_e K_{cu} < 4.53$$

$$11.2 < K_{ce} K_{cu} < 21.4$$

여기에서, ω_{ref} 값과 멤버쉽함수의 관계를 고려하

여 K_e 값을 기준으로 초기값을 (0.02, 0.1, 115)으로 설정하였다. 이런 초기치 계인 설정을 기반으로 각각의 scaling factor를 검증하기 위하여 초기값의 0.5, 2배에 해당하는 다른 2개 값을 추가하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 4, 그림 5, 그림 6은 K_e , K_{ce} , K_{cu} 각각의 파라미터 변화에 상응하는 FPI의 속도응답이다.

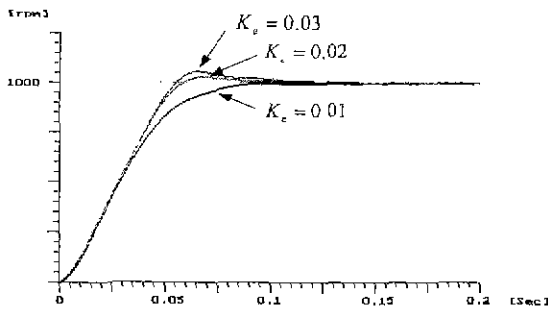


그림 4. K_e 값을 변화시켰을 경우 FPI 속도응답
Fig. 4 Speed responses of the FPI controller with different K_e

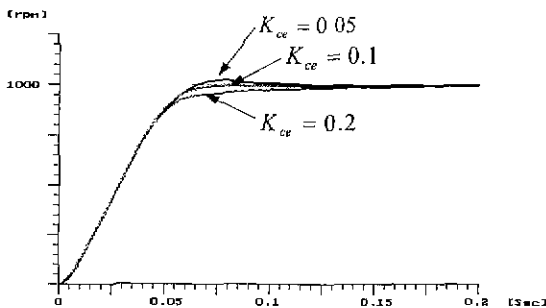


그림 5 K_{ce} 값을 변화시켰을 경우 FPI 속도응답
Fig. 5 Speed responses of the FPI controller with different K_{ce}

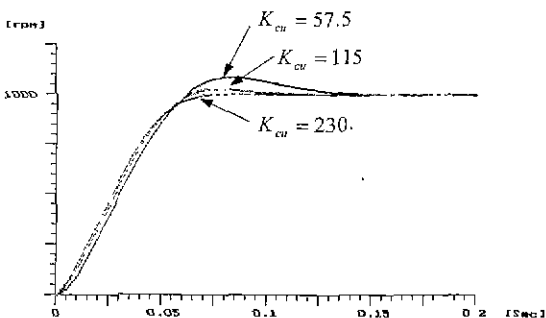


그림 6 K_{cu} 값을 변화시켰을 경우에 FPI 속도응답
Fig. 6 Speed responses of the FPI controller with different K_{cu}

시뮬레이션 결과에서 볼 수 있는 것처럼, FLC는 아주 강인하고, 초기치 scaling factor의 설정값이 좋은 특성을 보여 주었다. 이때 광범위로 scaling factor를 변화시킴에도 양호한 시스템 응답의 결과를 얻었다. 실제로 퍼지 scaling factor의 선택은 상승시간, 오버슈트, 그리고 안정성 사이에 타협이다. 따라서, 다음의 결과를 고려하여 FPI scaling factor를 구할 수 있다.

- 1) K_e 의 변화는 상승시간과 정착시간에 많은 영향을 주지 않지만, K_e 값의 증가는 약간의 오버슈트를 발생시킨다.
- 2) K_{ce} 가 작을 때, 시스템 응답의 정착시간은 짧지만 상대적으로 큰 오버슈트를 갖는다. 그리고 K_{ce} 가 큰 값일 때, 오버슈트는 사라지지만 시스템 응답이 늦어진다.
- 3) K_{cu} 는 시스템 응답의 상승시간에 큰 영향을 준다. 보통 큰값의 K_{cu} 는 출력의 변화를 빠르게 하므로 상승시간을 줄일 수 있다. 이에 반하여, 작은 값의 K_{cu} 는 늦은 응답특성이 나타난다.

5. 결론

본 연구는 PI 와 FPI제어기 사이에 함수적인 등가로부터 FPI scaling factor를 결정하기 위한 분석적인 방법을 확인하였다. 또한, FPI scaling factor를 설정하기 위해 필요한 PI계인 값을 Chircozzi[3]가 제안한 최적 이득 설정값을 이용하지 않고, 전달함수를 이용한 이득 설정값을 이용하여도 양호한 특성을 얻을 수 있었다.

이것을 검증하기 위해서 BLDC모터를 대상으로 시뮬레이션결과 FPI scaling factor의 튜닝과 초기치 선택이 적합하다는 것을 알 수 있었다.

퍼지 로직 제어기는 시스템 외란과 비선형시스템에 강인한 특성을 갖는다. 또한 본 연구에서 고찰한 FPI scaling factor를 이용하여 FLC 성능은 보다 더 개선될 수 있다.

참고 문헌

- [1] D.Q Zhang, "Fuzzy logic control of electric drives," Ph.D thesis, University of L'Aquila, Italy, 1995.
- [2] 小山正人, 玉井伸三, AC サーボ시스템의 理論と設計の實際, 総合電子出版社, 1990
- [3] E. Chircozzi, F. Parasiliti, M. Tursini, and D. Q. Zhang, "Fuzzy Self-tuning PI Control of PM Synchronous Motor Drives," International Journal of Electronics, pp 211-221, Feb. 1996.