

복합형 퍼지-PID 제어기의 자동동조에 관한 연구

(A Study on the Auto Tuning of Hybrid Type Fuzzy PID Controller)

李相錫* · 金重基** · 裴晉鎬***

(Sang-Seock Lee · Jung-Ki Kim · Jin-Ho Bae)

요 약

본 연구는 공정제어를 위한 복합형 퍼지-PID 제어기의 개발에 관한 것이다. 제안된 복합형 퍼지-PID 제어기는 퍼지 규칙을 기반으로 한 이득 결정부분(K_p , K_d)과 고정이득(k_i)을 합친 제어기이다.

모의실험 결과 제안된 제어기는 고정된 파라미터를 갖는 전통 PID 제어기에 비해 더욱 양호한 제어성능을 나타내었다.

Abstract

This paper describes the development of a hybrid type fuzzy-PID controller for process control. The proposed hybrid type fuzzy-PID controller can determine proportional and derivative gain from the rule-based fuzzy inference engine using errors and error changes, and have a fixed integral gain.

Simulation results show that the control performances of the proposed controller are superior to the ones of the conventional PID controllers.

1. 서 론

현대 제어 이론의 눈부신 발전에도 불구하고 PID 제어기는 목표치의 추적, 외란 효과의 감쇠, 플랜트와 모델 계수의 불일치에 대한 강인성 등 제어계에 요구되는 제반 특성 면에서 우수한 기능을 보유하고 있으며, 구조가 단순하고, 구현의

단순성 때문에 현재까지 산업플랜트 설비계통에 가장 많이 이용되고 있는 제어기이다.¹⁾

그러나 PID 제어기는 제어기의 계수를 플랜트의 동특성에 따라서 적절히 조절하기 위해 숙련된 기술자의 경험을 바탕으로 시행착오법으로 동조되고 있으며, 많은 시간과 노력이 소비된다. 또한 플랜트 조건의 변화나 가변 부하의 경우에는 수시로 제어계수를 조정해야 하므로 효과적인 제어를 수행할 수 없다.^{2~4)}

이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 최근 연구되고 있는 퍼지 PID제어는 퍼지집합 이론의 응용분야로서 입출력 관계의 정량적인 분석이 어

*正會員：嶺南專門大學 電氣科 教授

**正會員：嶺南專門大學 電氣科 副教授

***正會員：嶺南大學校 電氣工學科 教授

接受日字：1995年 9月 2日

려운 다변위 공정제어 시스템에 모델을 기준으로 한 기존 제어기들의 부적합한 점들을 보완 대체하고 기존의 제어 이론으로 제어하기 어려운 대상들에 잘 적응하며, 실시간 제어가 가능하다는 것이다.^{5),6)}

비록 퍼지 PID 제어기의 구조가 전통 PID 제어기와는 다르지만 제어기의 계수가 오차와 오차의 변화량 또는 다른 제 량들에 의해서 실시간 결정될 수 있는 비선형 PID 제어기로 생각 할 수 있다. ^{7),8)}

본 연구에서는 다양한 부동작시간을 갖는 지연 계로 모델링된 플랜트(Plant)들을 Pade 근사화한 후 Ziegler-Nichols(Z-N)의 한계감도법으로 초기 제어계수를 결정하고, 최대오버슈트(Maximum overshoot), 상승시간(Rise time), 정정시간(Settling time)을 고려하여 경험을 바탕으로 한 제어 규칙을 구성하였으며, 새로운 복합형(Hybrid type) 퍼지 PID 제어기를 제시하였다.

본 연구에서 제시한 복합형 퍼지-PID 제어기는 최대초과량, 정정시간등에서 기존의 제어기 보다 우수한 특성을 보였으며, 응답이 비교적 느린 비선형 제어설비 계통에 적용하면 양호한 특성을 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 제안된 복합형 퍼지-PID 제어에 대한 모의실험은 Microsoft사의 Matlab를 이용하였다.

2. PID 제어기

PID 제어기의 전달함수는 식 (1)과 같이 주어진다.

$$G_c(s) = K_p + K_i/s + K_d s \dots\dots\dots (1)$$

여기서 K_p , K_i 그리고 K_d 는 각각 비례, 적분, 미분 이득이다. PID 제어기에 대한 이산시간 등가 표현은 식 (2)와 같이 주어진다.

$$U(k) = K_p e(k) + K_i T_s \sum_{k=1}^n e(k) + k_d \Delta e(k) / T_s \dots\dots\dots (2)$$

여기서 $U(k)$ 는 제어신호 $e(k)$ 는 기준값과 플랜트출력 사이의 오차, T_s 는 제어기의 샘플링

(Sampling) 주기이며, $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$ 로 주어진다. 주어진 플랜트에 대해서 PID 제어기의 파라미터의 최적 조정값을 발견한다는 것은 쉬운 일이 아니다. 본 연구에서 제안된 퍼지 자동동조 PID 제어기를 갖는 시스템의 구성도를 그림 1과 같이 표시하였다. PID 제어기의 자동동작 개념은 이미 잘 알려진 바와 같이 오차(e), 오차변화분(Δe), 오차의 적분성분(K_i)를 서로 적절한 가중치(Weights)로 조합시켜 새로운 제어신호로 사용한다. 그림 1에 제안된 구성도는 일반적인 제어기의 개념측면에서 보면, 퍼지-PID 제어에서는 오차(e)와 오차의 변화성분(Δe)만의 비율 배분의 조합으로 구성되므로 결국 이 두 성분에 의해서 출력 변수(U_{pd})값이 결정되므로 PID제어와 비교하면, PD제어에 상당한다. 이 관계를 표시하면, 식 (3), (4)와 같이 주어진다.

$$U_{pd}(k) = K_p e(k) + K_d \Delta e(k) / T_s \dots\dots\dots (3)$$

식 (3)에서 PID제어와 비교해보면, 오차의 적분항이 무시된 것과 같다. 이로 인해 정상상태의 특성이 나빠지는 것을 방지하기 위해서 오차를 합수로 하는 $U_i = K_i T_s \sum_{k=1}^n e(k)$ 를 추가하면, 식 (4)와 같은 출력 변수를 갖는 방정식을 얻을 수 있다.

$$U = U_{pd} + U_i \dots\dots\dots (4)$$

식 (4)에서 파라미터 K_p , K_d 는 다음과 같은 퍼지규칙에 의해서 결정된다.

If $e(k)$ is A_i and $\Delta e(k)$ is B_i , then K_p is C_i and K_d is D_i
 $i = 1, 2, 3, \dots\dots\dots m$

$e(k)$ 와 $\Delta e(k)$ 에 대한 소속함수(Membership

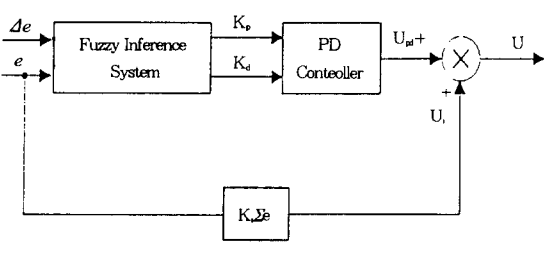


그림 1. 복합형 퍼지 PID 제어기의 블럭선도
 Fig. 1. Block diagram of the hybrid type fuzzy PID controller

Function)는 그림 2에 표시하였으며, 그림에서 NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB는 언어변수(Linguistic variables)로 다음과 같은 의미를 갖는다.

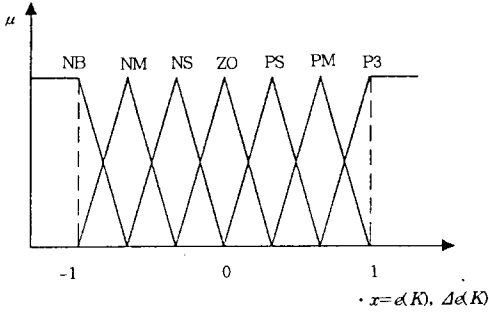


그림 2. $e(k)$ 와 $\Delta e(k)$ 에 대한 소속함수
Fig. 2. Membership functions for $e(k)$ and $\Delta e(k)$

NB : Negative Big PS : Positive Small
NM : Negative Medium PM : Positive Medium
NS : Negative Small PB : Positive Big
ZO : Zero

퍼지집합 C와 D에 대한 소속함수(MF)는 그림 3에 나타냈으며 Big과 Small로 특성화했다. 소속함수(μ)와 변수(χ)(= K_p , 또는 K_d)는 부록과 같이 주어진다.

일반적으로 Ziegler-Nichols방법으로 동조된 PID 제어기에 의한 플랜트의 계단응답은 그림4와 같다. 응답이 시작되는 점 a_1 부근에서는 빠른 상승시간을 얻기 위해서 큰 제어신호가 필요하며, 큰 제어신호를 얻기 위해서는 큰 비례이득과 큰 적분이득 그리고 적은 미분이득이 필요하다. 그래서 비례이득 K_p 는 퍼지집합에서는 Big으로 표시되며, 미분이득 K_d 는 퍼지집합에서는 Small로 표시된다.

그러므로 a_1 부근에서 퍼지규칙을 구성하면, 다음과 같이 주어진다.

IF $e(k)$ is PB and $\Delta e(k)$ is ZO then K_p is Big and K_d is Small.

점 b_1 부근에서는 큰 오버슈트(Overshoot)를 피하기 위해서 작은 제어신호가 필요하다. 따라서 작은 비례이득과 큰 미분이득이 필요하다. 그러므로 b_1 부근에서 퍼지규칙을 구성하면, 다음과 같이 주어진다.

IF $e(k)$ is ZO and $\Delta e(k)$ is NB then K_p is small

and K_d is Big.

따라서 위의 퍼지규칙을 이용하여 K_p 와 K_d 에 대한 동조규칙을 구성하면 표 1 및 표 2와 같이 주어진다.

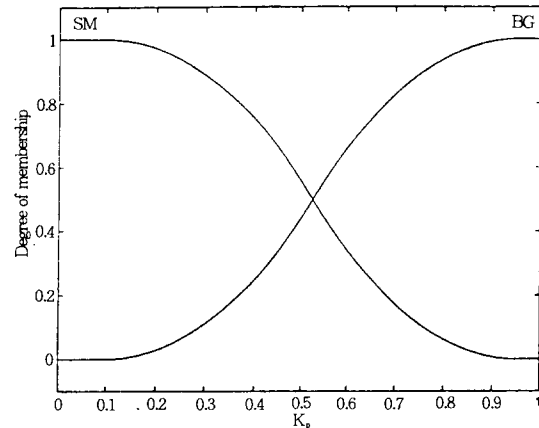
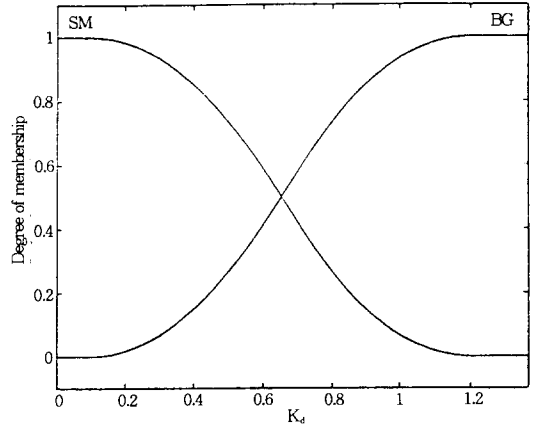


그림 3. K_p 와 K_d 에 대한 소속함수
Fig. 3. Membership functions for K_p and K_d

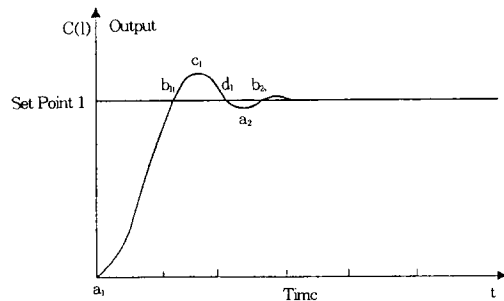


그림 4. Ziegler-Nichols법을 이용한 공정의 계단응답법
Fig. 4. Process step response by using Ziegler-Nichols method

표 1. K_p 에 대한 퍼지동조 규칙
Table 1. Fuzzy Tuning Rules for K_p

		$\Delta e(K)$							
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
e(K)	NB	B	B	B	B	B	B	B	
	NM	S	B	B	B	B	B	S	
	NS	S	S	B	B	B	S	S	
	ZO	S	S	S	B	S	S	S	
	PS	S	S	B	B	B	S	S	
	PM	S	B	B	B	B	B	S	
	PB	B	B	B	B	B	B	B	

표 2. K_d 에 대한 퍼지동조 규칙
Table 2. Fuzzy Tuning Rules for K_d

		$\Delta e(K)$							
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
e(K)	NB	S	S	S	S	S	S	S	
	NM	B	B	S	S	S	B	S	
	NS	B	B	B	S	B	B	B	
	ZO	B	B	B	B	B	B	B	
	PS	B	B	B	S	B	B	B	
	PM	B	B	S	S	S	B	B	
	PB	S	S	S	S	S	S	S	

3. 모의실험 결과 및 고찰

제안된 퍼지 PID 제어기를 시험하기 위해서 5개의 플랜트를 선정하였다. 선정된 플랜트는 부동작시간을 갖는 1차 지연계로서 적은 부동작시간에서부터 큰 부동작시간을 갖는 플랜트를 실험하므로써 폭넓은 플랜트의 적응성을 검토했다. 선정된 플랜트는 다음과 같다.

1. $G_{p1}(s) = \frac{e^{-0.5s}}{1+5s}$ 모델 (I)
2. $G_{p2}(s) = \frac{e^{-s}}{1+5s}$ 모델 (II)
3. $G_{p3}(s) = \frac{e^{-2s}}{1+5s}$ 모델 (III)
4. $G_{p4}(s) = \frac{e^{-9s}}{1+12s}$ 모델 (IV)
5. $G_{p5}(s) = \frac{e^{-12s}}{1+14s}$ 모델 (V)

그림 5에서 부터 9까지는 각각 Ziegler-Nichols 법과 제안된 복합형 퍼지-PID 제어기의 계단응답 특성을 비교한 것이며, 선정된 모든 플랜트에 대해서 제안된 복합형 퍼지-PID 제어기의 고정이득(K_i)값만을 적절히 조정함으로써 양호한 응답특성을 보여주고 있다. 표3에 모의실험 결과를 요약했다.

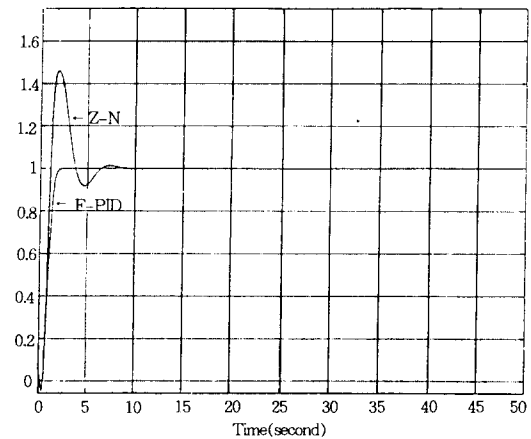


그림 5. 모델 (I) 계단응답의 비교
Fig. 5. Comparison of step response for model (I)

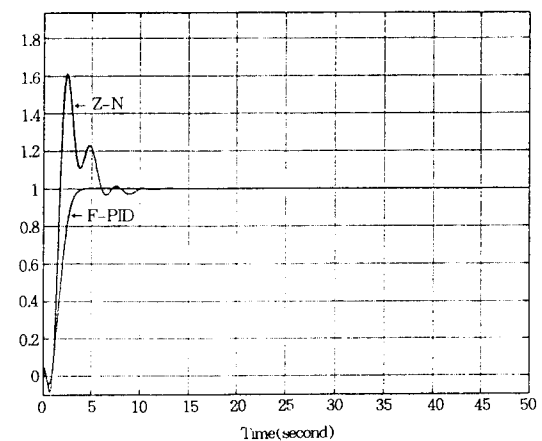


그림 6. 모델 (II) 계단응답의 비교
Fig. 6. Comparison of step response for model (II)

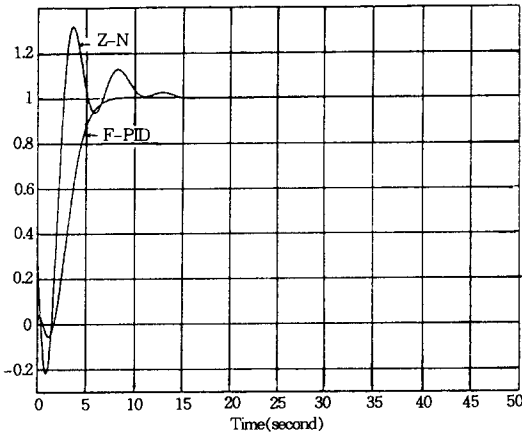


그림 7. 모델(III) 계단응답의 비교
Fig. 7. Comparison of step response for model(III)

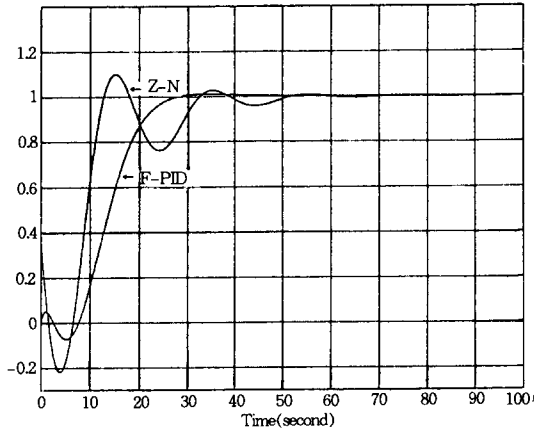


그림 8. 모델(IV) 계단응답의 비교
Fig. 8. Comparison of step response for model(IV)

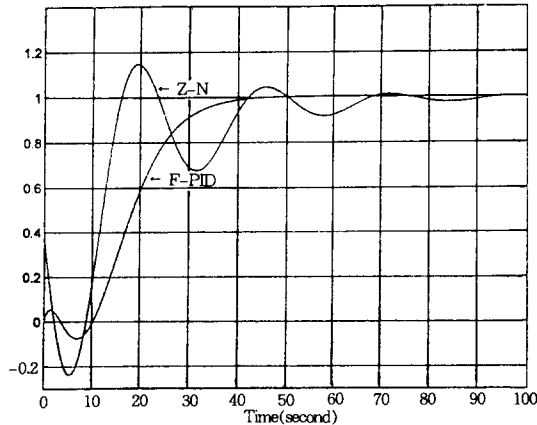


그림 9. 모델(V) 계단응답의 비교
Fig. 9. Comparison of step response for model(V)

표 3. 시뮬레이션 결과 요약
Table 3. Summary of Simulation Results

Plant Model	Ziegler-Nichols PID Controller		Proposed PID Controller
$G_1(s) = \frac{e^{-0.5s}}{1+5s}$	$K_p=7.5000$ $K_i=7.5000$ $K_d=1.8750$	$Y_{\alpha}=46.67(\%)$ $T_r=1.04(\text{sec})$ $T_s=7.83(\text{sec})$	$Y_{\alpha}=0(\%)$ $T_r=1.80(\text{sec})$ $T_s=1.67(\text{sec})$
$G_2(s) = \frac{e^{-s}}{1+5s}$	$K_p=6.0000$ $K_i=3.0000$ $K_d=3.0000$	$Y_{\alpha}=61.78(\%)$ $T_r=1.67(\text{sec})$ $T_s=8.56(\text{sec})$	$Y_{\alpha}=0(\%)$ $T_r=2.70(\text{sec})$ $T_s=3.13(\text{sec})$
$G_3(s) = \frac{e^{-2s}}{1+5s}$	$K_p=2.8571$ $K_i=0.7143$ $K_d=2.8571$	$Y_{\alpha}=34.34(\%)$ $T_r=2.55(\text{sec})$ $T_s=13.75(\text{sec})$	$Y_{\alpha}=0(\%)$ $T_r=5.21(\text{sec})$ $T_s=5.83(\text{sec})$
$G_4(s) = \frac{e^{-2s}}{1+12s}$	$K_p=1.5385$ $K_i=0.0855$ $K_d=6.9231$	$Y_{\alpha}=10.48(\%)$ $T_r=11.80(\text{sec})$ $T_s=51.25(\text{sec})$	$Y_{\alpha}=0(\%)$ $T_r=15.83(\text{sec})$ $T_s=23.33(\text{sec})$
$G_5(s) = \frac{e^{-12s}}{1+14s}$	$K_p=1.4634$ $K_i=0.0610$ $K_d=8.7850$	$Y_{\alpha}=15.23(\%)$ $T_r=14.58(\text{sec})$ $T_s=89.54(\text{sec})$	$Y_{\alpha}=0(\%)$ $T_r=28.75(\text{sec})$ $T_s=34.58(\text{sec})$

Y_{α} : 최대오버슈트(Maximum Overshoot)

T_s : 2(%) 정정시간(Settling Time)

T_r : 상승시간(Rise Time)

K_p : 비례이득(Proportional Gain)

K_i : 적분이득(Integral Gain)

K_d : 미분이득(Derivative Gain)

4. 결 론

본 연구에서는 전문가가 운용한 것과 같은 동조 특성을 갖는 제어 알고리즘을 제안했으며, 동시에 퍼지규칙을 기반으로 한 이득결정 부분(K_p , K_d)과 고정이득(K_i)을 합친 복합형 제어기의 가능성을 제시하였다.

최대 초과량, 정정시간등에서 우수한 특성을 보였으며, 시험한 모든 플랜트에 대해 이상적 동작을 보임으로써 폭넓은 플랜트에 적용이 가능할 것으로 기대된다.

K_p , K_d 의 소속함수 μ 와 변수 χ 에 대한 선택과 동조규칙은 실험적으로 얻어졌다. 향후 이상적인 동조규칙에 대한 지속적인 검토와 연구가 진행되고, 다양한 플랜트에 대한 적용 방법을 검토하면 우수한 특성을 갖는 제어기로의 발전이 가능할 것으로 사료된다.

본 논문은 '96년도 영남전문대학 산업기술연구소가 주관하는 학술연구 지원비에 의해서 수행되었음

참 고 문 헌

- 1) T. Hagglund and K.J. Astrom, "Automatic Tuning of PID Controllers," Instrument Society of America, 1988.
- 2) K.J. Astrom, "Toward Intelligent Control : Keynote Speech the 1988 ACC", IEEE Control System Magazine, PP. 60-64, April 1989.
- 3) Peter J. Gawthrop, Panos E. Nomikos, "Automatic Tuning of Commercial PID Controllers for Single-Loop and Multiloop Applications", IEEE Control Syst Mag. Vol.10, PP.34-42, 1990.
- 4) M. Zhuang, D.P. Atherton, "Automatic Tuning of Optimum PID Controllers" IEE Proceeding-D, Vol.140, No.3, pp.216-224, May, 1993.
- 5) Zhen-Yu Zhao, Masayoshi Tomizuka, Satoru Isaka, "Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers," IEEE Trans, on Systems, Man and Cybernetics, Vol.23, No.5, pp. 1392 -1398, SEPT/OCT, 1993.
- 6) Yung Yaw Chen, Chiy Ferng Perng, "Input Scaling Factors in Fuzzy Control Systems" Thrd IEEE International Conference on FUZZY Systems, PP. 1666-1670, June 26-29, 1994.
- 7) Hao Ying, "The Simplest Fuzzy Controllers using Different Inference Methods are Differnt Nonlinear Proportional-Integral Controllers with Variable Gains" Automatica, Vol. 29, No.6, pp.1579-1589, 1993.
- 8) Pal P. Wang, Ching Yu Tyan, "Fuzzy Dynamic system and Fuzzy Linguistic Controller Classification" Automatica, Vol.30, No.11, pp.1769-1774, 1994.

부록 (Appendix)

* K_{big}값

$$u_{Kbig} = A[0] + A[1] \times X + \dots + A[n] \times X^n$$

Polynomial Coefficients :

A[0]= 0.0	A[5]= -31.72787416
A[1]= -0.11850013	A[6]= 20.11515520
A[2]= 1.54145556	A[7]= -5.13216765
A[3]= -5.40527935	A[8]= 0.27810584
A[4]= 21.38410469	

$$u_{Ksmall} = A[0] + A[1] \times X + \dots + A[n] \times X^n$$

Polynomial Coefficients :

A[0]= 1.00000000	A[5]= 134.59932159
A[1]= 0.77574711	A[6]= -89.17572846
A[2]= -9.33462386	A[7]= 30.0432967
A[3]= 44.12985175	A[8]= -4.04910617
A[4]= -107.83875464	

* K_{big}값

$$u_{Kbig} = A[0] + A[1] \times X + \dots + A[n] \times X^n$$

Polynomial Coefficients :

A[0]= 0.0	A[5]= -57254.6924768
A[1]= -3.48666007	A[6]= 160672.834151
A[2]= 121.21255251	A[7]= -291875.055424
A[3]= -1711.70614563	A[8]= 342636.935639
A[4]= 12861.2256127	

$$u_{Ksmall} = A[0] + A[1] \times X + \dots + A[n] \times X^n$$

Polynomial Coefficients :

A[0]= 1.00000000	A[5]= -279673.885418
A[1]= -26.69791383	A[6]= 736146.104413
A[2]= 822.66784880	A[7]= -1275894.43378
A[3]= -10232.9995294	A[8]= 1447425.02209
A[4]= 68508.1308770	

◇ 著 者 紹 介 ◇



이 상 석(李相錫)

1948년 7월 20日生. 1972년 嶺南大學 工科學科 電氣工學科 卒. 1976년 嶺南大學校 大學院 電氣工學科 卒(碩士). 1985년 嶺南大學校 大學院 電氣工學科 卒(博士). 現在 嶺南專門大學 電氣科 教授.



김 중 기(金重基)

1961년 10월 16日生. 1984년 嶺南大學 工科學科 電氣工學科 卒. 1987년 嶺南大學校 大學院 電氣工學科 卒(碩士). 1994년 嶺南大學校 大學院 電氣工學科 卒(博士). 現在 嶺南專門大學 電氣科 副教授.



배 진 호(裴晉鎬)

1931년 7월 6日生. 1965년 서울大學校 工大 電氣工學科 卒. 1975년 嶺南大學校 大學院(博士). 1981년~1984년 大韓電氣學會 大邱支部 支部長. 1984년 大韓電氣學會 電氣機械研究會 幹事長. 1985년 大韓電氣學會 副會長. 現代 嶺南大學校 工大 電氣工學科 教授 .