

유전자알고리즘을 사용한 PID제어기에서의 SRM 성능개선

서기영* · 이수흠* · 류재엽** · 문상필* · 이내일*

경남대학교 공과대학 전기공학과* · 창원기능대학 전기과**

A study of improving SRM of PID controller using genetic algorithms

K.Y. Suh* · S.H. LEE* · J.Y.Ryu** · S.P. Mun* · N.I. Lee*

Kyungnam University* · Chang-won Polytechnic Collage**

< ABSTRACT >

We propose a new method to deal with the optimized auto-tuning for the PID controller which is used to the process-control in various fields. First of all, in this method, initial values are determined by the Switched Reluctance Motor of system and Ziegler-Nichols method. After deciding binary strings of parents generation using by the fitness values of genetic algorithms, we perform selection, crossover and mutation to generate the descendant generation. The advantage of this method is better than the neural network and multiple regression model method in characteristic of output, and has extent of applying without limit of initial parameters.

1. 서 론

현대 제어이론의 발전에도 불구하고 산업 현장에서 널리 사용되는 제어기의 대부분은 여전히 비례-미분-적분항의 세가지 모드로 구성된 PID 제어기이며, 그 이유는 광범위한 동작조건에서 견실한 성능을 가져오며 공학자로 하여금 간단하면서 쉽게 동작할 수 있는 단순성의 필요에 기인하여 제어 기술자에게는 가장 익숙한 제어 방식이기 때문이다.¹⁾

최근 제어이론과 마이크로 프로세서의 발전으로 PID 제어기 계수를 자동으로 동조하는 연구가 활발히 진행되어 제어 시스템에 여러 방식으로 적용²⁾되고 있으며 최근의 새로운 전력전자기술의 발달에 초점을 맞추어 스위치드 릴럭턴스 모터(SRM : Switched Reluctance Motor)³⁾에 관한 연구 및 실용화로의 노력이 활발히 이루어지고 있다. 이러한 스위치드 릴럭턴스 모터는 스텝핑 모터의 가변 릴럭턴스형(Variable Reluctance Type)과 동일하게 돌극구조(salient pole)를 가지며, 브러시리스 DC 모터(Brushless DC Motor)와 같이 위치검출기를 통해 회전자의 상태를 검출하여 제어 회로를 통해 가변속운전이 가능한 전동기이다.

본 연구에서는 이러한 점을 착안하여 기존의 PID 제어기의 최적 자동 동조에 관한 설계를 유전자알고리즘⁴⁾을

통하여 보완하고 이를 SRM의 속도제어에 적용시키는 방법을 제안하고자 하며, 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 입증하고자 한다.

2. SRM의 기본원리 및 회로구성

2.1 SRM의 기본원리

그림 1은 고정자와 회전자가 돌극형으로 이루어져 있는 6/4 SRM의 구조를 나타낸다. 그림 1에서 β_s 와 β_r 은 각각 고정자와 회전자의 극호이며 인덕턴스가 변화하는 중요각($\theta_1 \sim \theta_5$)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= \frac{1}{2} \times \frac{2\pi}{N_r} - \frac{1}{2}(\beta_s + \beta_r) \\ \theta_2 &= \theta_1 + \beta_s \\ \theta_3 &= \theta_2 + (\beta_r - \beta_s) \\ \theta_4 &= \theta_3 + \beta_s \\ \theta_5 &= \theta_4 + \theta_1 (\because \theta_5 = \frac{2\pi}{N_r}) [rad] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

여기서, N_r 은 회전자의 극수분 나타낸다. 회전자 1회당 인덕턴스의 변화회수는 회전자 극수와 같고 주기는 식 1에서 θ_5 와 같이 나타낼 수 있다.

그림 2는 회전자의 위치에 따라 인가되는 전류와 인덕턴스 변화 및 토크를 나타낸 것이다. 그림 2에서 점선은 인덕턴스의 변화물 실선은 전류분 나타내고 있다. 권선의 인덕턴스는 고정자의 돌극부와 회전자의 돌극부가 일치할 때 인덕턴스는 최대 즉 자기저항(reluctance)이 최소가 되고, 회전자의 돌극부가 고정자의 돌극부 사이에 즉 중앙에 위치할 때 인덕턴스는 최소가 된다. 그리고 회전자 위치에 대해서 인덕턴스 변화를 선형으로 근사화하면 일정한 여자전류에서의 토크가 얻어진다.

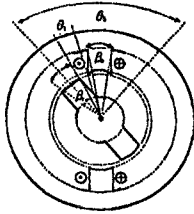


그림 1. 6/4 SRM의 구조
Fig. 1. 6/4 SRM Structure

SRM의 전압 방정식은 식 2와 같이 나타낼 수 있다.

$$V = Ri(\theta) + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt}$$

$$= Ri(\theta) + \frac{d\lambda(\theta, i)}{di} \frac{di}{dt} + \frac{d\lambda(\theta, i)}{d\theta} \omega \quad (2)$$

식 2에서 첫째 항은 고정자 권선의 저항에 의한 손실 성분이고, 둘째 항은 자기회로에 축적되는 에너지 성분이며, 셋째 항이 기계적인 에너지로 변환되는 성분이다. 이때의 토크의 식은 식 3과 같이 나타낼 수 있다.

$$T(\theta) = \frac{1}{2} i^2(\theta) \cdot \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (3)$$

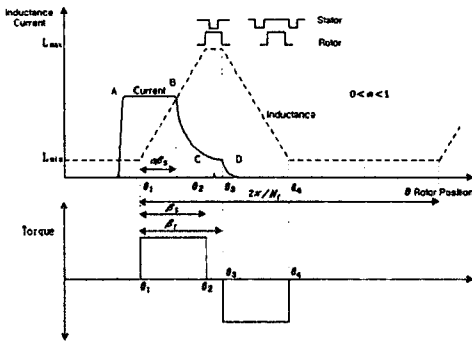


그림 2. 회전자 위치에 따른 인덕턴스, 전류 및 토크 파형
Fig. 2. Inductance, Current and Torque Waveform by the Position of Rotor

토크 발생구간($\theta_1 \sim \theta_4$)인 인덕턴스가 가변 구간에서 인덕턴스의 변화량이 일정하고, 전류변화(di/dt)가 없는 Flat-top 전류를 갖게 조정하면 토크의 맥동 성분을 줄일 수 있게 되고, 일정속도운전 및 안정운전이 가능하다. 그림2에서 인덕턴스가 증가하는 구간($\theta_1 \sim \theta_2$)의 위치에 대해서는 정 토크가 발생하고, 인덕턴스가 감소하는 구간($\theta_3 \sim \theta_4$)의 위치에 대해서는 그와 똑같은 크기의 부 토크가 발생하게 된다. 따라서 일정한 여자를 하면 정 토크와 부 토크가 서로 상쇄되어 전동기의 축 토크는 영이 되므로 전동력을 얻을 수 없다. 그러므로 부 토크의 발생을 방지하고, 효과적인 전동기 토크를 얻기 위해서는 반드시 회

전자 위치각에 대한 정보를 얻어서 연속적인 스위칭 여자를 하는 것이 필요하다. SRM의 회전자 위치검출기를 필요로 하는 이유가 여기에 있다. 다른상에 대해서도 같은 모양의 회전자 위치에 대해서 여자를 절환해 가면 연속적인 회전 토크가 얻어진다.

그림 3은 실험에 사용한 구동회로를 나타낸 것이다. 이 구동회로는 각상마다 독립적으로 제어 동작하며, 동작원리가 간단하고, 자기에너지의 회생이 용이한 특성을 가지고 있다. 이 구동회로의 동작은 다음과 같다. 먼저 2개의 스위치 S_A^+ , S_A^- 를 동시에 on하면, 경로 1을 통해 고정자 코일에 전류가 흐른다. 그리고 스위치 2개를 동시에 off하면 2개의 다이오드 D_A^+ , D_A^- 를 통해서 코일에는 역방향의 전압이 인가되고, 코일에 축적되어진 자기에너지는 경로2에 따라 환류 되어진다.

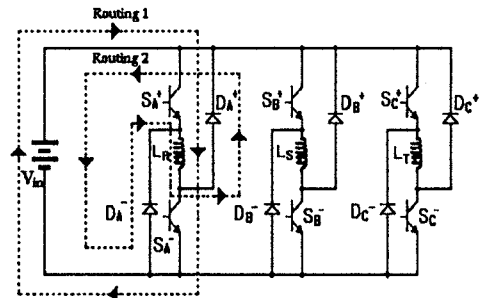


그림 3. 구동회로
Fig. 3. Driving Circuit

3. PID제어기의 구성

3.1 PID제어기의 구성

시스템에 사용되는 제어기를 구성하기 위하여 PID제어기의 전달함수($G_c(s)$)와 제어대상 SRM의 전달함수($G_p(s)$)으로 모델링된 제어대상의 정수들을 이용하여 제어기의 폐루프전달함수를 정식화하고, 이로부터 제어대상의 계단 응답을 역라플라스변환에 의하여 계산하였다. 그림 4는 플랜트 PID제어의 개략도를 나타낸 것이다.

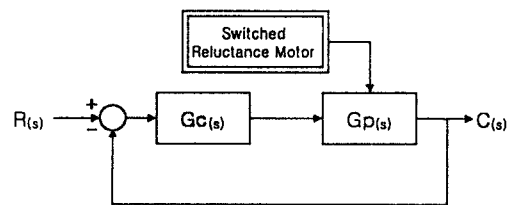


그림 4. 플랜트의 PID제어
Fig. 4. PID control for plant

그림 5는 Ziegler-Nichols⁵⁾ 한계감도법을 통하여 산출된 PID 계수들 부모세대의 적합도 값으로 하여 구한 유전자 알고리즘의 블록선도이다.

이 블록선도에서는 기존의 방법을 통한 PID계수들을 사용, 유전자 알고리즘의 입력 스트림에 2진수의 벡터형식으로 입력시켜서 그 값을 적합도 값으로 사용한 것으로 선택, 교배, 돌연변이를 통하여 다음 세대들을 계속적으로 평가하여 최적화 된 PID계수를 구함으로써 기존의 방법보다 나은 출력응답을 구할 수 있다.

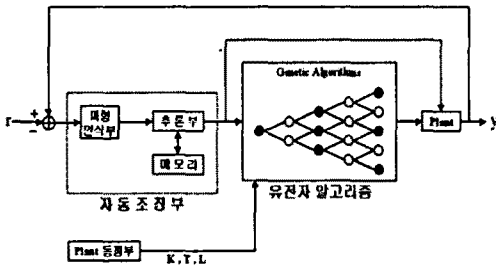


그림 5. 유전자 알고리즘의 블록선도
Fig. 5. Block diagram of genetic algorithms

3.2 제어기 및 제어대상의 정식화

시뮬레이션에 사용한 PID제어기의 전달함수는 식 4와 같이 정의된다.

$$G_C(S) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I S} + T_D S \right) \quad (4)$$

여기서 K_P 는 제어기의 비례이득, T_I 는 적분시간, T_D 는 미분시간이다.

Ziegler-Nichols의 한계감도법에 의해 식 4에서 초기 PID 제어계수를 $T_D=0$, $T_I=\infty$ 로 설정함으로써 전달함수는 식 5와 같다.

$$G_C(S) = K_P \quad (5)$$

제어대상은 본 논문에서 소개한 SRM의 속도 모델링으로 식 6과 같은 관계를 나타낼 수 있다.

$$T = K_t i \quad (6)$$

$$e = K_e \frac{d\theta}{dt}$$

식 6으로 부터 Kirchhoff 법칙과 Newton의 법칙에 기초하여 식 7과 같은 방정식을 세울 수 있다.

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} = K_i \quad (7)$$

$$L \frac{di}{dt} + Ri = V - K \frac{d\theta}{dt}$$

식 7을 라플라스 변환하여 식 8와 같은 모델링방정식으로 나타낼 수 있다.

$$s(Js + b) \theta(s) = KI(s) \quad (8)$$

$$(Ls + R)I(s) = V - Ks \theta(s)$$

식 8에서 $I(s)$ 를 제거하면 식 9와 같은 개루프 전달함수를 구할 수 있다.

$$\frac{\theta}{V} = \frac{K}{(Js + b)(Ls + R) + K^2} \quad (9)$$

여기서 회전 각속도 $\dot{\theta}$ 는 출력이고 전압 V 는 입력이다.

식 5와 식 9에 의해 전방경로 전달함수 $G(s)$ 를 계산하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G(s) = K_P \frac{\theta}{V} = \frac{K_P K}{(Js + b)(Ls + R) + K^2} \quad (10)$$

최종적으로 제어대상의 페루프 전달함수를 계산하면 식 11과 같다.

$$M(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)} = \frac{K_P K}{(Js + n)(Ls + R) + K^2 + K_P K} \quad (11)$$

위의 식에 의해서 제어계수(K, J, b, R, L, V, θ)를 결정한 후 Ziegler-Nichols의 한계감도법과 Routh-Hurwitz의 안정도 판별법을 이용하여 PID 제어계수 (K_P, T_I, T_D)를 구하여 원하는 응답특성을 얻을 수 있다.

3.3 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘은 초기값인 부모세대가 2진 스트림과 그것에 따른 함수로 주어졌다면 이것을 선택과 교배, 돌연변이를 통하여 다음세대를 만들고 이를 반복하여 전역적인 최적의 값을 구하는 일종의 자연의 현상을 모델링한 확률적인 탐색방법으로 2.2절에서의 방법으로 구한 Ziegler-Nichols방법의 PID계수들을 유전자 알고리즘의 부모세대에 초기값인 2진 스트림과 적합도 값으로 넣어 그것들에 대한 계산을 하게되면, 그 PID계수들에 따른 계단응답 파형은 기존의 Ziegler-Nichols방법보다 더욱 좋은 계단응답을 구할 수 있었고, Neural Network의 역전파알고리즘 및 다변량 선형회귀분석에서의 단점인 학습범위라는 한정된 영역이 없으므로 폭넓은 특성을 보인다.

유전자알고리즘은 선택, 교배, 그리고 돌연변이를 통한 개체집단을 구하고 그 개체집단의 세대를 통하여 다음 평가를 받는다. 이 평가는 다음 선택과정을 위한 확률분포를 만드는데 사용된다. 즉, 현재의 적합도값에 비례하는 크기를 갖는 룰렛 선택을 하는데 사용된다. 나머지 진화는 위의 단계들을 주기적으로 반복하는 것에 불과하다.

4. 제어 알고리즘

3장에서 정의된 PID제어기 자동동조과정을 살펴보면, 제어대상을 결정하기 위한 정수분 입력받아 제어대상을

결정하여 기존의 Ziegler-Nichols의 한계감도법에 의한 PID계수들을 유전자알고리즘에 입력시켜 선택, 교배, 돌연변이를 통하여 모수 추정을 한 후, 초기의 부모세대에서부터 계속적으로 반복되는 차세대들 거쳐가면 기존의 Ziegler-Nichols방법보다 출력특성이 좋은 P, I, D계수와 파형이 나타내어진다. 이때의 순서도는 그림 6과 같이 나타낼 수 있다.

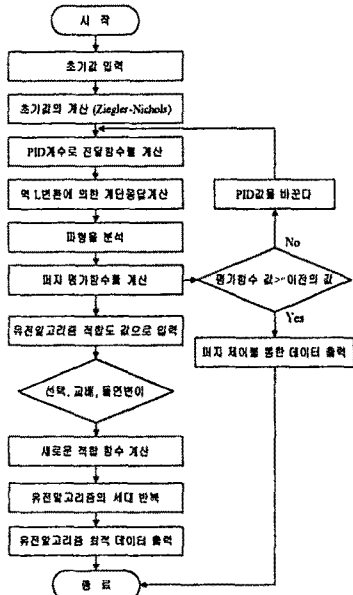


그림 6. 제안된 제어기의 순서도
Fig. 6. Flow chart of the proposed control system

5. 시뮬레이션 및 고찰

위와 같이 구성된 제어기를 시뮬레이션 하기 위해서 수치계산 프로그램언어인 MATLAB⁶⁾을 이용하여 자동 동조 프로그램을 제작 사용하였으며, 시뮬레이션에 사용된 제어 대상은 다음과 같은 3가지 모델을 선정하였다. 먼저 모델 1과 모델 2는 SRM의 물리적 파라미터가 동일한 가운데 유전자 알고리즘의 자손세대수를 변화시켜 그 응답을 보인 것이고, 모델 3은 모델 1과 모델 2에서와는 다른 SRM의 물리적 파라미터를 사용하여 그 출력응답을 비교하도록 하였다.

1 SRM의 물리적 파라미터
table 1 Physical parameter of SRM

구분	Model 1, 2	Model 3
회전자관성모멘트 (J)	0.01	0.5
감쇄율 (b)	0.1	0.05
토크정수 ($K=K_e=K_t$)	0.01	0.2
전기저항 (R)	1	10
전기자 인덕턴스 (L)	0.5	1.2
자손세대수	20 80	80

본 연구에서는 Ziegler-Nichols한계감도법을 이용한 PID계수를 유전자 알고리즘의 2진스트링의 적합도값 및 입력값으로 사용하였다.

제어대상을 첫 번째 경우 모델 1, 2로 정의하였을 때의 Ziegler-Nichols방법, 유전자 알고리즘(Model 1, Model 2)의 계단응답을 시뮬레이션 한 결과를 그림 7~10에 나타내었다. 여기서 그림 10은 모델 1과 모델 2의 유전자 알고리즘 파형을 하나로 합쳐 확대한 것으로 세대수의 증가에 따른 파형의 안정성을 확인할 수 있었다.

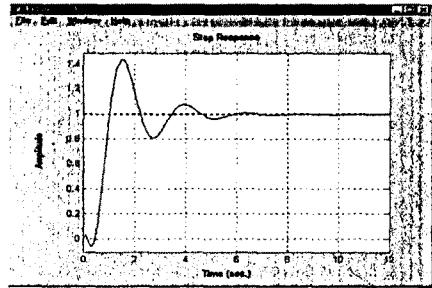


그림 7. Ziegler-Nichols방법에 의한 계단응답 (모델 1)
Fig. 7. Step-response by Ziegler-Nichols method (model 1)

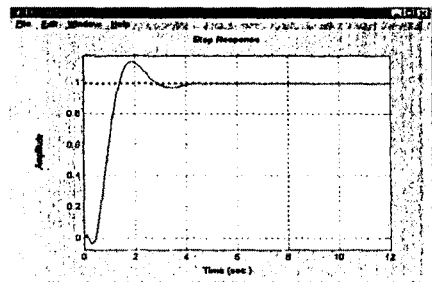


그림 8. 유전자 알고리즘에 의해 추론된 계단응답 (모델 1)
Fig. 8. Step-response by genetic algorithm (model 1)

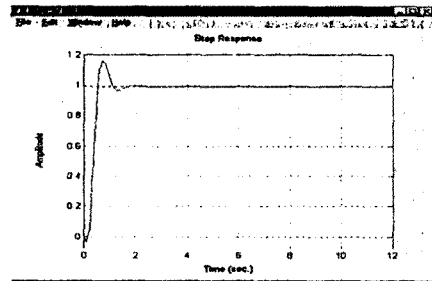


그림 9. 유전자 알고리즘에 의해 추론된 계단응답 (모델 2)
Fig. 9. Step-response by genetic algorithm(model 2)

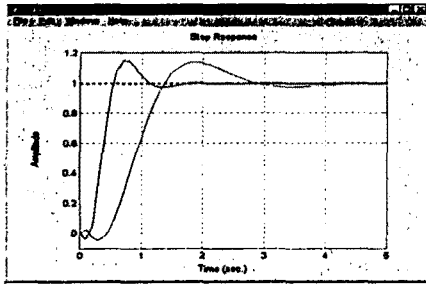


그림 10. 유전자 알고리즘에 의해 추론된 계단응답 (모델 1.2)
Fig. 10. Step-response by genetic algorithm(model 1.2)

모델 1에 대한 시뮬레이션 결과를 살펴보면 Ziegler-Nichols방법에 의한 계단응답 보다 유전자 알고리즘에 의한 계단응답이 안정됨을 볼 수 있다. 그리고 유전자 알고리즘에 의해 차 세대에서 추론된 계단응답은 자손의 세대수를 늘리므로 좋은 응답특성을 구할 수 있다.

이에 따라 모델2에서는 유전자 알고리즘의 자손 수를 모델1에서의 20단계로 하지 않고 80단계로 늘려서 사용한 방식으로 그림 9에 나타내었다. 여기서 그림 8보다 자손의 수가 많으므로 더욱 안정한 파형을 얻을 수가 있었다. 여기서 유전자 알고리즘의 최적값은 80단계가 끝날 때의 마지막 값이 최적의 값이 되는 것이 아니라, 80단계 중 가장 뛰어난 전역적인 값을 최적의 값으로 가지게 된다.

다음은 제어대상을 모델 3으로 정의하였을 때의 Ziegler-Nichols방법과 유전자 알고리즘의 계단응답을 시뮬레이션 한 결과를 그림 11, 12에 나타내었다.

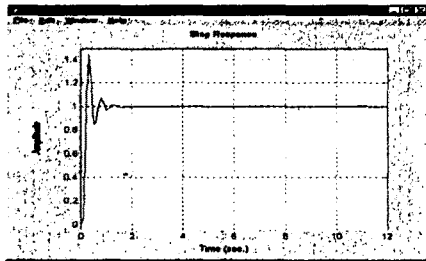


그림 11. Ziegler-Nichols방법에 의한 계단응답
Fig. 11. Step-response by Ziegler-Nichols method(model 3)

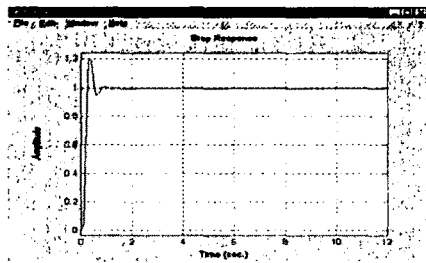


그림 12. 유전자 알고리즘에 의해 추론된 계단응답
Fig. 12. Step-response by genetic algorithm(model 3)

모델 3의 결과를 보면, 앞서와 마찬가지로 Ziegler-Nichols방법보다 유전자 알고리즘에 의한 계단응답특성이 향상됨을 볼 수 있다. 모델 1, 2, 3을 살펴보면 Ziegler-Nichols방법에 의한 계단응답과 유전자 알고리즘에 의해 추론된 계단응답을 비교해 볼 때, 유전자 알고리즘의 자손의 수를 높임, 즉 선택, 교배, 돌연변이율을 높임으로써 Ziegler-Nichols방법에 의한 계단응답보다 더욱 좋은 파형이 출력되는 것을 볼 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 기존의 Ziegler-Nichols방법을 유전자 알고리즘을 사용한 자동동조 PID 제어기로 제안하고 SRM에 그 제어기를 시뮬레이션함으로써 그 타당성을 입증하였다.

기존의 Ziegler-Nichols의 방법과 비교하여 이 방법의 특징은 다음과 같다.

- 1) 유전자 알고리즘은 제어대상의 물리적 파라미터의 변화에도 적응성이 좋다.
- 2) 유전자 알고리즘은 신경망이론⁷⁾, 다변량 선형회귀모형⁸⁾에서의 학습을 위한 입력값의 범위가 따로 주어지지 않으므로 기존의 방식에 비해 응용범위가 넓다.
- 3) 제어규칙을 찾기 힘든 비선형성이 강한 시스템에도 적용이 가능하다.

그러나 유전자 알고리즘의 자손세대수의 범위를 얼마나 길게 해야하는지 또한 그것에 따른 전역적인 정밀도 향상이 완료되는 시점을 찾는 것이 향후 연구과제로 남는다.

참 고 문 헌

1. GAWTHROP,P,J , "Automatic Tuning of Commercial PID Controllers computer control of real-Time processes.", IEEE control system magazine January pp. 37-57, 1990.
2. K.J Astrom et al. , "Automatic tuning and adaptation for PID Controllers - A survey", Control Eng, Practice Vol.1 No.4, pp. 699-714, 1993.
3. 會澤, 西濱, "スイッチドリラクタンスモータの運轉特性と損失" 電氣學會回轉機研究會資料, RM-98-22
4. Zbigniew Michalewicz , "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs" pp.13-54, 1992
5. J.G Ziegler, N.B Nichols, "optimum settings for automatic controllers", Trans ASME Vol.65, pp. 433-444, 1942.
6. Andrew Grace, Alan J.Laub, John N.Little, Clay M.Thompson . "Control System toolbox for use with Matlab" pp.1.1-1.80, 2.1-2.180, 1992
7. 李壽欽, 朴賢泰, 李來一, "전력실비시스템을 위한 퍼지 평가함수의 신경회로망을 사용한 PID제어기의 자동동조" 照明·電氣設備學會誌 第13卷 第2號, pp. 63-70, 1999
8. 김기영, 전명식, "다변량 통계자료 분석" pp.97-119, 1997