

설계사양을 고려한 AVR 시스템의 PSO 기반 PID 제어기

이윤형

한국해양수산연수원 해양플랜트교육팀

PSO-Based PID Controller for AVR Systems Concerned with Design Specification

Yun-Hyung Lee

Offshore Training Team, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology

요약 비례-적분-미분(PID) 제어기는 단순한 구조와 넓은 범위의 운전영역에서 견고한 성능으로 인해 산업계에서 널리 사용되고 있다. 그러나 제어대상으로서 AVR(Automatic Voltage Regulator)은 전력 시스템의 파라미터의 변동에 강인하지 않다. 따라서 PID 제어기를 사용하여 AVR 시스템의 안정성과 성능을 향상시키는 것이 필요하다. 본 논문에서는 PSO(Partial Swarm Optimization) 알고리즘을 사용하여 AVR 시스템을 위한 최적 PID 제어기 파라미터를 결정하는 새로운 설계 방법을 제시한다. 제안하는 접근법은 쉬운 구현뿐만 아니라 안정된 수렴 특성 및 양호한 계산 효율과 우수한 특성을 갖는다. 또한, 제안된 PSO-PID 제어기의 성능을 평가하기 위해 새로운 목적함수를 정의한다. 이 목적함수는 최대백분율 오버슈트와 정정 시간이 설계사양으로 주어진 경우 이를 반영하기 위한 것이다. 이를 위해 ITAE 평가함수에 제약 조건을 위반하면 벌점을 부과하도록 하여 PSO 알고리즘이 PID 제어기 파라미터를 탐색할 때 설계사양을 만족하도록 하게 한다. 최종적으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안한 PSO-PID 제어기는 단자전압 계단응답에 대해 주어진 설계사양을 만족할 뿐만 아니라 다른 유사한 최근의 연구보다 더 우수한 제어 성능을 보임을 확인하였다.

Abstract The proportional-integral-derivative(PID) controller has been widely used in the industry because of its robust performance and simple structure in a wide range of operating conditions. However, the AVR(Automatic Voltage Regulator) as a control system is not robust to variations of the power system parameters. Therefore, it is necessary to use PID controller to increase the stability and performance of the AVR system. In this paper, a novel design method for determining the optimal PID controller parameters of an AVR system using the particle swarm optimization(PSO) algorithm is presented. The proposed approach has superior features, including easy implementation, stable convergence characteristic and good computational efficiency. In order to assist estimating the performance of the proposed PSO-PID controller, a new performance criterion function is also defined. This evaluation function is intended to reflect when the maximum percentage overshoot, the settling time are given as design specifications. The ITAE evaluation function should impose a penalty if the design specifications are violated, so that the PSO algorithm satisfies the specifications when searching for the PID controller parameter. Finally, through the computer simulations, the proposed PSO-PID controller not only satisfies the given design specifications for the terminal voltage step response, but also shows better control performance than other similar recent studies.

Keywords : AVR System, Design Specification, Performance Criterion Function, PID Controller, PSO Algorithm

*Corresponding Author : Yun-Hyung Lee(KIMFT)

Tel: +82-51-620-5823 email: domse54@daum.net

Received July 16, 2018

Revised August 29, 2018

Accepted October 5, 2018

Published October 31, 2018

1. 서론

산업현장에서 사용하는 동기발전기는 필요한 곳에 전원을 공급하는 장비이다. 전력계통에서 발생하는 유효전력에 대한 수요변화는 본질적으로 주파수에 영향을 미치고, 무효전력의 변화는 전압크기에 영향을 주게 된다. 이와 같은 전력수요 변화에 대처하기 위해 엔진에는 조속기(governor)가 발전기에는 자동전압조정기(automatic voltage regulator)가 설치되어 있다. 일반적으로 무효전력의 공급처는 발전기 또는 전원 네트워크에 별도로 설치하는 커패시터 등이며 발전기에 있어서 무효전력은 계자의 여자전류에 의해 제어된다.

발전기의 여자시스템은 발전기의 전압을 일정하게 유지하고, 자동전압조정기를 사용하여 무효전력을 제어한다. 이처럼 자동전압조정기의 역할은 동기발전기의 단자전압 크기를 지정된 수준으로 유지하는 것이다[1]. 따라서 자동전압조정기 시스템의 안정성은 전력 시스템을 운용함에 있어 큰 영향을 미치게 된다. 또한, 발전기의 계자권선의 높은 인덕턴스와 부하 변동 등으로 안정적이며 빠른 응답특성을 갖는 전압조정기를 설계하는 것은 쉽지 않다. 지금까지 출력 단자전압을 일정하게 유지하기 위한 다양한 제어기법이 제안되었으며, 이 중에서 PID제어기가 가장 효과적인 것으로 알려져 있다[2].

PID 제어기는 예측 제어, 내부 모델 제어, 슬라이딩 모드 제어와 같은 제어기법의 발전에도 불구하고 단순한 구조, 명성, 견고한 성능 및 쉬운 구현으로 제어 응용 분야에서 널리 적용되고 있다[3].

안정한 시스템의 경우, PID 제어기는 추종문제와 외란제거 문제 모두 양호한 제어 성능을 보인다. 그러나 제어기의 비례 및 미분 킥(kick) 동작으로 인해 오버슈트와 정착시간이 증가하기도 한다[4].

기존의 많은 PID 제어기 튜닝 방법은 제어대상에 대해 시간지연을 갖는 1차 또는 2차 형태의 축소 모델이 필요하며, 이 모델에 의존적일 수밖에 없다. 또한, 대부분 고전적인 PID 동조 방법은 최상의 성능을 위해서 수치계산도 필요로 한다. 이와 같은 이유로 최근에는 휴리스틱(heuristic) 알고리즘 기반의 제어기 동조 방법의 연구들이 많아지고 있다. 이러한 휴리스틱 알고리즘 기반의 최적화 방법은 제어공학 문제에서도 강력한 도구로 사용되고 있다[5-10].

대표적인 휴리스틱 알고리즘으로는 GA(Genetic Algorithm)[10], ACO(Ant Colony Optimization) [11],

BFO(Bacterial Foraging Optimization)[12] 및 PSO(Particle Swarm Optimization)[5-8] 등이 있으며 다양한 분야에서 광범위하게 응용되고 있다.

이들 가운데 PSO 알고리즘은 Kennedy와 Eberhart가 처음 소개 한 것으로 단순화 시킨 군집(social) 시스템의 시뮬레이션을 통해 제안되었으며 연속적인 비선형 최적화 문제 해결에 강인함을 보이고 있다[13-18]. 이 기법은 다른 확률적 기법보다 짧은 연산시간 안에 최적해의 탐색이 가능하고, 안정된 수렴 특성을 보인다[16-18]. 이와 같은 PSO 알고리즘의 특성은 PID 제어기 파라미터 동조문제를 해결하기 위한 탁월한 방법이다. 따라서 본 논문에서는 PSO 알고리즘을 기반으로 최적의 PID 제어기를 설계하는 PSO-PID 제어기법을 적용하기로 한다.

한편, 일반적으로 제어환경에는 사용자가 설정하는 제어성능이 존재하고, 이는 제약조건형태로 나타나게 된다. 이를 반영하기 위해 PSO 알고리즘의 목적함수는 주어진 제약조건을 만족하면서 PID 제어기 파라미터를 탐색할 수 있도록 벌점함수를 추가한 새로운 형태를 사용한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서 자동전압조정기 시스템에 대해 설명한다. 제3장에서는 PSO 알고리즘을 설명하고, 제약조건을 고려한 PSO-PID 제어기의 설계 과정을 제시한다. 제4장에서는 본 연구의 기법과 기존의 방법과 비교를 위한 시뮬레이션을 수행하고, 이를 비교·분석한다. 제5장은 이상의 결과를 바탕으로 결론을 요약한다.

2. 동기발전기의 자동전압조정기 모델

자동전압조정기는 동기발전기의 출력 단자전압을 일정하게 유지하기 위한 장치이다. 간단한 형식의 자동전압조정기는 증폭기(amplifier), 여자기(exciter), 발전기(generator) 및 센서(sensor)의 네 가지 요소로 구성되어 있다. Fig. 1은 자동전압조정기 시스템을 나타낸 것이다.

발전기의 출력전압은 센서를 통해 피드백되며 기준신호와의 오차신호가 증폭기를 통해 증폭되고, 여자기를 거쳐 발전기에 인가되는 모습을 보이고 있다.

본 논문에서 위의 네 가지 구성 요소에 대해 기존 연구에서 많이 적용하는 포화 및 비선형성을 무시한 선형화 모델[19-20]을 고려하기로 한다.

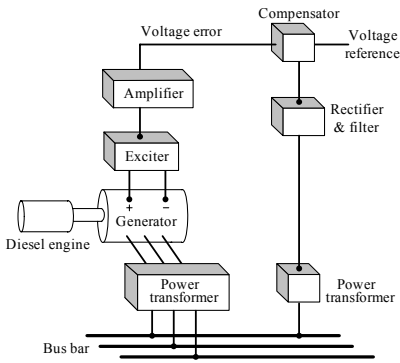


Fig. 1. A model of AVR system

2.1 증폭기

증폭기는 이득과 시정수로 표현되며 전달함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$G_a = \frac{K_a}{T_a s + 1} \tag{1}$$

여기서 K_a 와 T_a 는 각각 증폭기의 이득과 시정수를 의미한다. 일반적으로 K_a 는 10~40의 값을 T_a 는 0.02~0.1[s]의 아주 작은 값의 범위를 갖는다.

2.2 여자기

여자기는 이득 K_e 과 시정수 T_e 로 표현되며 다음과 같이 전달함수를 나타낼 수 있다.

$$G_e = \frac{K_e}{T_e s + 1} \tag{2}$$

여기서 K_e 는 일반적으로 1.0~10의 값을 T_e 는 0.4~1.0[s]의 값을 갖는다.

2.3 발전기

발전기의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_g = \frac{K_g}{T_g s + 1} \tag{3}$$

여기서 K_g 는 발전기의 이득, T_g 는 부하에 의존적인 발

전기의 시정수이다. 전부하에서 무부하 사이에 K_g 는 0.7~1.0의 값을 T_g 는 1.0~2.0의 값을 갖는다.

2.4 센서

센서는 간단한 1차 전달함수로 표현할 수 있으므로, 센서의 이득 K_s 와 시정수 T_s 로 나타낼 수 있다.

$$G_s = \frac{K_s}{T_s s + 1} \tag{4}$$

여기서 T_s 는 아주 작은 값으로 0.001~0.06의 값을 갖고, K_s 는 1.0의 값을 갖는다.

지금까지 설명한 자동전압조정기의 네 가지 구성요소를 블록선도로 나타내면 Fig. 2와 같고, Table 1은 전달함수와 각 파라미터의 변동범위 및 공칭값을 정리한 것이다.

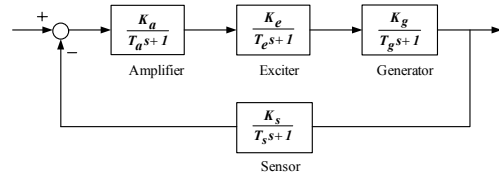


Fig. 2. AVR system without controller

Table 1. Transfer function of AVR system

AVR component	Transfer function	Parameters	
		Gain	nominal values
Amplifier	$\frac{K_a}{T_a s + 1}$	$10 \leq K_a \leq 40$	$K_a = 10$
		$0.02 \leq T_a \leq 0.1$	$T_a = 0.1$
Exciter	$\frac{K_e}{T_e s + 1}$	$1.0 \leq K_e \leq 10$	$K_e = 1.0$
		$0.4 \leq T_e \leq 1.0$	$T_e = 0.4$
Generator	$\frac{K_g}{T_g s + 1}$	$0.7 \leq K_g \leq 1.0$	$K_g = 1.0$
		$1.0 \leq T_g \leq 2.0$	$T_g = 1.0$
Sensor	$\frac{K_s}{T_s s + 1}$	$0.001 \leq T_s \leq 0.06$	$K_s = 1.0$ $T_s = 0.01$

공칭값을 이용하면 Fig. 2의 폐루프 전달함수는 다음과 같이 정리된다.

$$G_m(s) = \frac{0.1s + 10}{0.0004s^4 + 0.045s^3 + 0.555s^2 + 1.51s + 11} \tag{5}$$

식 (5)에서 알 수 있듯이 제어기가 없는 자동전압조정기는 두 개의 실근인 $s=100, -12.5$ 와 2개의 복소근 $s=-0.5285 \pm j4.6648$ 을 갖는 진동하지만 안정한 시스템이다. 단위계단 응답특성은 상승시간(t_r)이 0.261[s], 정정시간(t_s)은 6.97[s], 0.755[s]에서 최대오버슈트 1.5이다. 또한, 정상상태 이득은 0.909이다.

3. PSO-PID 제어기 설계

3.1 PID 제어기

PID 제어기는 단순한 구조, 견고한 성능 및 쉬운 구현으로 인해 널리 사용되어왔으며 다음과 같이 3가지 요소의 동작으로 이루어져 있다.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

여기서 $u(t)$ 는 제어입력, $e(t)$ 는 오차이고, K_p 는 비례이득, K_i 는 적분이득, K_d 는 미분이득을 나타낸다.

Fig. 3은 자동전압조정기 시스템에 단자전압을 유지하기 위한 PID 제어기를 적용하여 나타낸 것이다.

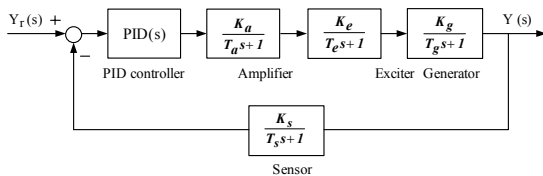


Fig. 3. AVR control system with PID controller

Fig. 3에서 식 (6)으로 표현되는 PID 제어기가 포함된 자동전압조정기 시스템의 전달함수는 식 (7)로 정리할 수 있다.

$$G_{AVR} = \frac{0.1K_d s^3 + A s^2 + B s + 10K_i}{0.0004s^5 + 0.045s^4 + 0.555s^3 + C s^2 + D s + 10K_i} \quad (7)$$

단, $A = 0.1K_p + 10K_d$, $B = 0.1K_i + 10K_p$, $C = 1.51 + K_d$, $D = 1 + 10K_p$ 이다.

3.2 PSO 알고리즘

PSO 알고리즘은 1995년에 Kennedy와 Eberhart에 의해 개발된 일종의 진화형태의 알고리즘[13]으로 벌레나 새, 물고기 등의 무리(swarm)가 서로 정보교환 및 협력을 통하여 이동하는 형태를 모사한 최적화 기법이다.

다른 휴리스틱 알고리즘과 다르게 PSO 알고리즘은 탐색공간에서 전역해(global solution)와 지역해(local solution) 사이를 균형 있게 탐색함으로써 초기에 지역해로 수렴하는 단점을 해결할 수 있다. 또한, 알고리즘이 단순하고, 비교적 작은 수의 알고리즘 파라미터를 가지며, 간단한 컴퓨터 코딩(coding)으로 구현 가능한 장점을 가지고 있다.

진화형태의 알고리즘처럼 진화연산자를 사용하여 개체를 조작하는 대신 PSO 알고리즘에서 각 개체는 자체의 이동 경험과 무리의 이동 경험에 따라 동적으로 조정되는 속도로 탐색공간을 이동하게 된다.

PSO 알고리즘에서 처음의 집단은 임의의 위치 x_i 와 속도 v_i 로 초기화되며 이때 무리 내의 각 개체는 D 차원의 탐색 공간 전체에 무작위로 흩어져 있게 된다. 이후 평가된 목적함수의 값에 따라 개체 자신의 경험 및 무리 전체의 경험을 통해 무리 내부의 각 개체는 위치와 속도를 동적으로 조정하게 된다. 최적화하는 동안 각 개체는 지금까지 얻은 최적의 위치(p_{best} , $P_{i,D}^t$)를 기억하고, 전체 무리의 모든 개체에 의해 달성된 전역 최적 위치 정보(g_{best} , $G_{i,D}^t$)를 얻는다.

D 차원 탐색 공간에서 k 번째 세대의 i 번째 개체의 위치 $x_{i,n}^k = [x_{i,1}^k, x_{i,2}^k, x_{i,3}^k, \dots, x_{i,D}^k]$ 로 표현되며, 속도 $v_{i,n}^k = [v_{i,1}^k, v_{i,2}^k, v_{i,3}^k, \dots, v_{i,D}^k]$ 로 정의된다.

다음 세대에서 각 개체의 위치와 속도는 식 (8)과 같이 계산되며, Fig. 4에 이 과정을 그림으로 나타내었다.

$$\begin{aligned} v_{i,D}^{k+1} &= w v_{i,D}^k + c_1 r_1 \cdot (p_{i,D}^k - x_{i,D}^k) + c_2 r_2 \cdot (g_{i,D}^k - x_{i,D}^k), \\ x_{i,D}^{k+1} &= x_{i,D}^k + v_{i,D}^{k+1} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 c_1 은 인지 매개변수(cognitive parameter)로 각 개체를 지역 최적위치로 끌어들이는 가속상수, c_2 는 사회적 매개변수(social parameter)로 각 개체를 전역 최적위치로 끌어당기는 역할을 한다. r_1 과 r_2 는 $[0, 1]$ 범위의 난수를 의미한다.

식 (8)에서 w 는 현재 세대에서 현재 속도에 대한 이전 속도의 강도를 조정하는 관성하중으로 PSO 알고리즘의 수렴에 중요한 역할을 한다.

관성하중이 크면 전역탐색이 강화되고, 반대로 작은 값으로 설정하면 지역탐색이 강화된다. 하지만 적절하지 못한 값이 선정되면 전역해를 탐색하지 못할 수 있다. 관성하중 선정에는 다양한 방법이 있으나 본 논문에서는 식 (9)와 같이 탐색 초기에는 관성 하중을 큰 값으로 선정하고, 탐색이 진행될수록 관성하중이 비선형적으로 작아지는 방법을 사용한다. 이를 통해 초기에는 전역탐색을 강화하고, 세대가 진행되어 최적해에 근접하게 될수록 지역탐색에 더 비중을 가지도록 하였다.

$$w_k = (w_{max} - w_{min}) \cdot (t_i / t_{max})^2 - (w_{max} - w_{min}) \cdot (2t_i / t_{max}) + w_{max} \quad (9)$$

여기서 w_{max} 는 관성하중의 최대값, w_{min} 은 관성하중의 최소값을 의미한다.

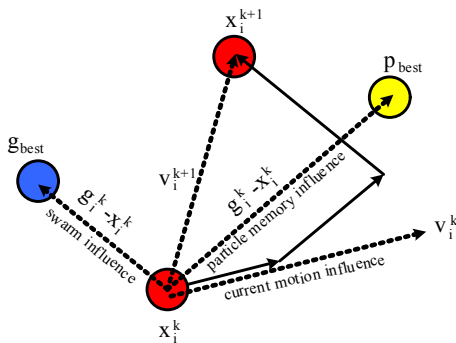


Fig. 4. Illustration of PSO particle reproduction

지금까지 설명한 PSO 알고리즘의 구현은 다음과 같이 6단계로 정리할 수 있다.

단계 1 (무리의 초기화)

사용자가 설정한 무리의 크기 N 에 대하여, 최적화 변수값의 최소값과 최대값 사이에서 개체를 무작위로 생성시킨다.

단계 2 (목적함수의 평가)

각 개체의 목적함수 값을 주어진 성능기준을 사용하

여 평가한다.

단계 3 (p_{best} 와 g_{best} 의 초기화)

무리의 초기 개체에 대해 위에서 얻은 목적함수 값을 개체의 초기 p_{best} 값으로 설정한다. 모든 p_{best} 값 중에서 최적의 값을 g_{best} 로 설정한다.

단계 4 (속도 업데이트)

각 개체에 대한 새로운 속도를 식 (8)의 첫 번째 항을 사용하여 계산하고, 업데이트한다.

단계 5 (위치 업데이트)

개체의 위치는 식 (8)의 두 번째 항을 사용하여 업데이트한다. 목적함수는 개체의 업데이트 된 위치에 대하여 다시 계산된다. 만약, 새로운 목적함수 값이 이전 p_{best} 보다 좋으면 새로운 값이 p_{best} 로 설정된다. 마찬가지로, g_{best} 값도 최적의 g_{best} 로 업데이트한다.

단계 6 (정지 조건)

정지조건이 충족되면 p_{best} 로 표시되는 개체의 위치가 최적의 값이 된다. 그렇지 않으면 위의 절차는 지정된 조건이 완료 될 때까지 단계 4에서 다시 반복된다.

3.3 설계사양을 고려한 목적함수

일반적인 PID 제어기 설계는 설계사양으로 주어지는 제약조건이 없는 비제약성 최적화 문제로 볼 수 있다.

그러나 본 논문에서는 실제 제어환경을 고려하여 식 (10)과 같이 최대백분율오버슈트(M_p) 및 2% 정정시간(t_s)을 설계사양으로 선정하여 제약성 문제로 생각하기로 한다.

$$\begin{cases} M_p(K) \leq k_1 [\%] \\ t_s(K) \leq k_2 [s] \end{cases} \quad (10)$$

여기서 k_1 과 k_2 는 제어환경을 고려하여 설계자가 결정하는 상수이다.

이 같은 제약 조건을 해결하기 위해서 본 논문에서는 별점함수가 결합된 목적함수를 새롭게 정의한다. 이는 PSO 알고리즘이 PID 제어기의 파라미터를 탐색하는 과

정에서 무리내의 잠정적인 해들이 제약조건을 위반하여 부적합한 해를 탐색하면 그 위반 정도를 반영하여 목적함수에 벌점을 추가하는 방법이다.

식 (11)은 벌점함수 $P(K)$ 가 결합된 PSO의 목적함수를 나타낸 것이다.

$$F(K) = J(K) + P(K) \quad (11)$$

단,

$$P(K) = \begin{cases} 0, & K \text{가 적합한 해일 경우} \\ \rho_1(k_1 - M_p(K))^2 + \rho_2(k_2 - t_s(K))^2, & \\ K \text{가 부적합한 해일 경우} \end{cases} \quad (12)$$

여기서 ρ_1, ρ_2 는 각 제약조건에 대응하는 벌점상수로 설계자 설정한다. 또한, 목적함수 $J(K)$ 는 식 (13)과 같이 장기간의 과도현상에 대해 벌점을 부여하는데 유용한 시간곱절대오차적분(ITAE)를 고려한다.

$$J(K) = \int_0^{t_f} t|e(K, t)| dt \quad (13)$$

여기서 $K = [K_p, T_i, T_d]^T \in R^3$ 는 PID 제어기 파라미터로 구성되는 벡터로서 PSO 알고리즘에서 개체를 의미하며, e 는 오차, t_f 는 이후의 적분값을 무시할 수 있는 충분히 큰 시간이다. 이를 통해 제약성 최적화 문제는 식 (11)을 최소화 하는 비제약성 최적화 문제로 변경된다. Fig. 5는 지금까지 설명한 과정을 그림으로 나타낸 것으로, 그림과 같이 먼저 오프라인(off-line)에서 PID 제어기 파라미터를 동조한 후, 실시간(on-line)으로 적용하는 형태이다.

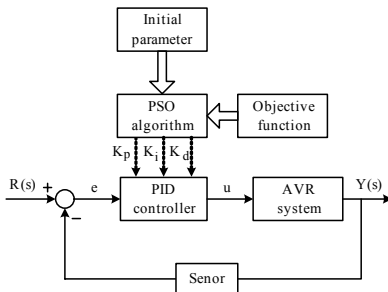


Fig. 5. Optimization of a constrained PID control system using the PSO.

4. 시뮬레이션 및 분석

본 장에서는 발전기 단자 전압의 단위계단 응답을 분석하기 위해 PSO-PID 제어기의 성능을 살펴본다. 자동 전압조정기의 전달함수에 사용된 공칭 이득과 시정수는 Table 1의 값을 사용하였다.

4.1 PSO의 PID 파라미터 탐색

앞에서 설명한 것과 같이 자동전압조정기의 PID 제어기 파라미터는 식 (11)로 표현된 목적함수를 최소화 하는 관점에서 PSO 알고리즘으로 동조된다. 설계사양으로 사용된 k_1 은 10.0[%], k_2 는 1.5[s]로 선정하였다. 이때 PSO의 제어변수로는 무리의 크기 $N=40$, $c_1=2.0$, $c_2=2.0$, $w_{max}=0.9$, $w_{min}=0.4$, 무리의 스텝 크기는 1, 최대 세대는 1000으로 설정하였다.

또한, PID 제어기 파라미터의 탐색범위는 모두 동일한 범위인 $0 < K_p, K_i, K_d < 30$ 이며, Fig. 6은 오프라인 상에서 세대에 따른 PSO 알고리즘의 목적함수와 w 의 변화를 나타낸 것이다.

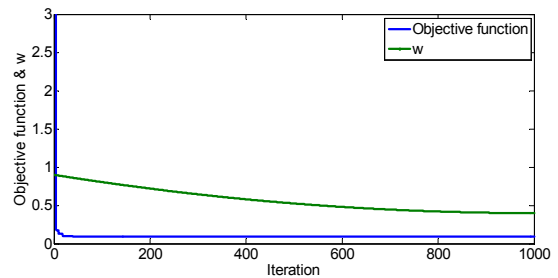


Fig. 6. Objective function of PSO algorithm

세대가 지나면서 목적함수가 작은 값으로 빠르게 수렴하고 있으며, w 는 식(9)로 표현된 것과 같이 최대값 w_{max} 와 최소값 w_{min} 사이에서 비선형적으로 감소하고 있다.

Fig. 7 역시 오프라인에서 세대가 진행될 때 무리의 PSO-PID의 제어기 파라미터, 즉 각 개체의 분포를 나타낸 것이다. 처음에는 각 개체가 탐색공간에 다양한 위치에 분포되어 있으나 세대가 지나면서 한 지점으로 점차 수렴해 가는 것을 확인할 수 있다.

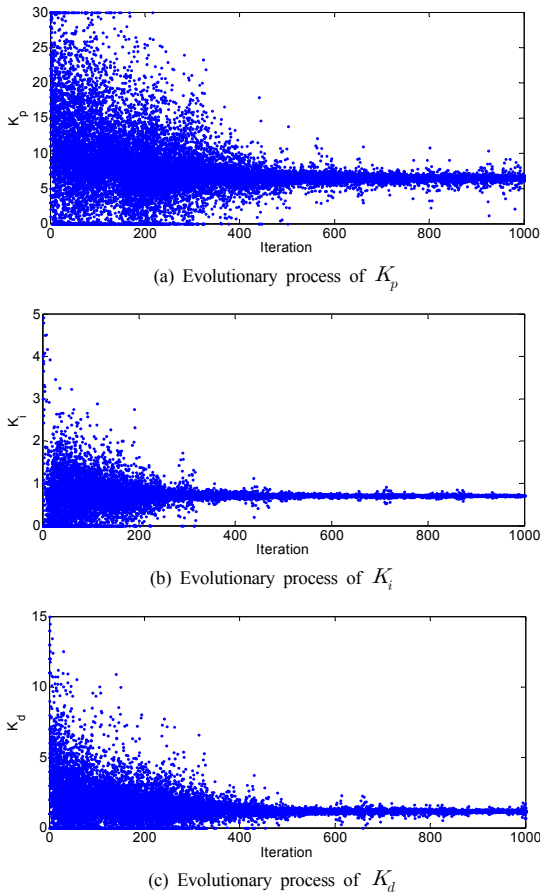


Fig. 7. Evolutionary process of parameters of PSO-PID

Fig. 8은 세대의 진행과정에 따른 무리의 g_{best} 를 나타낸 것이다. 최종적으로 PSO 알고리즘을 통해 오프라인에서 탐색된 PID 제어기 파라미터는 $K_p=6.2411$, $K_i=0.7024$, $K_d=1.1596$ 이다.

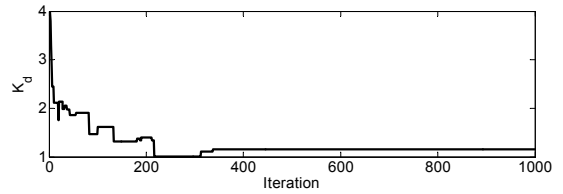
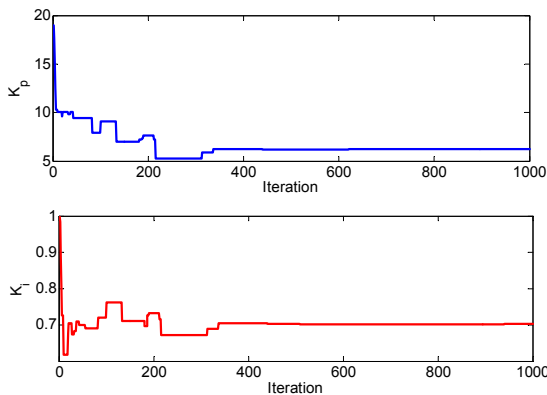


Fig. 8. Optimal PSO-PID controller parameters

4.2 단자전압 단위계단 응답 특성

본 절에서는 제안한 제어기법으로 오프라인에서 동조한 PID 제어기의 성능을 정량적으로 평가하도록 한다. 이를 위해 3.3절에서 제약조건으로 고려한 최대백분율 오버슈트(M_p)와 2% 정정시간(t_s)을 비롯하여 상승시간(t_r), 정상상태오차(e_{ss})를 기존연구와 비교하기 위해 시뮬레이션을 실시한다. 본 논문 및 기존 연구[21-24]에 사용된 알고리즘의 종류와 PID 제어기 파라미터 값은 Table 3에 정리하여 나타내었다.

Table 3. PID parameters of proposed and other's methods

Author/ Year	Algorithm	PID controller parameters		
		K_p	K_i	K_d
proposed	PSO	6.2411	0.7024	1.1596
Miavagh/ 2015[21]	PSO	0.8402	3.5	0.3315
Panda/ 2012[22]	MOL	0.9544	0.9434	0.9909
Gozde/ 2014[23]	CPSO	1.3064	1.0454	1.2400
Zhu/ 2009[24]	CAS	0.5235	0.4458	0.3940

위 5가지의 시뮬레이션 결과를 확인하기 위해 Fig. 9에 단위계단 응답을 비교하여 나타내었다.

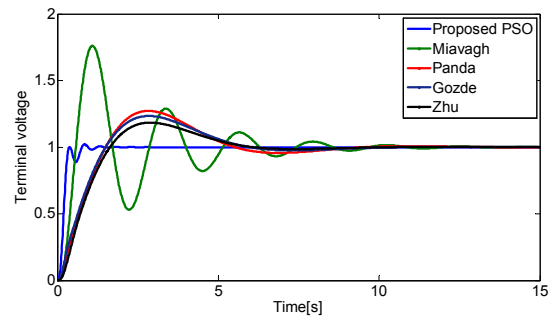


Fig. 9. Terminal voltage step response of the AVR system for different algorithms.

또한, 각각의 제어결과를 정량적으로 비교하기 위해 제어성능을 계산하여 Table 4에 정리하였다.

이를 분석하면 PSO-PID 제어기는 식(10)에서 제약조건으로 고려한 $M_p < 10.0[\%]$ 과 $t_s < 1.5[s]$ 를 모두 만족시키고 있을 뿐만 아니라 다른 기법들 보다 양호한 응답특성을 보인다. 다만, 비교 논문들은 제약조건 고려 없이 평가함수만을 이용하여 PID 제어기 이득을 동조하는 기법이므로 본 논문에서 선정한 제약조건을 만족하지 못하고 있다.

Table 4. Simulation results

Author/ Year	M_p	t_s	t_r	e_{ss}
proposed	2.2528	0.8737	0.1998	0.0
Miavagh/ 2015[21]	76.0743	9.3433	0.3441	0.0
Panda/ 2012[22]	27.1939	8.3799	1.0870	0.0120
Gozde/ 2014[23]	23.3441	8.1352	1.0865	0.0021
Zhu/ 2009[24]	18.4181	5.5320	1.1221	0.0

Table 5는 5가지의 제어결과에 대해 TAE, IAE, ISE로 표현되는 세 가지의 성능지수를 계산하여 나타낸 것이다. 표를 통해 확인할 수 있듯이 제안한 방법이 가장 작은 성능지수를 보이고 있다.

Table 5. Comparative analysis of performance indices

Author/ Year	ITAE	IAE	ISE
proposed	0.0482	0.2268	0.1544
Miavagh/ 2015[20]	4.3263	1.8110	0.8313
Panda/ 2012[1]	3.3372	1.4766	0.6212
Gozde/ 2014[21]	2.8071	1.3354	0.5535
Zhu/ 2009[22]	2.1904	1.2539	0.5937

5. 결론

본 논문에서는 자동전압조정기의 PID 제어기 설계 문제에 대해 다루었다. 이를 위한 접근방법으로서 PSO 알고리즘을 이용하는 방법을 사용하였다. 특히, M_p 와 t_s 를 제약조건으로 주어진 경우를 고려하였으며 이 제

약성 최적화 문제를 해결하기 위해 벌점함수를 추가한 새로운 형태의 목적함수를 적용한 PSO 알고리즘을 사용하였다. 이를 통해 PSO 알고리즘이 제약조건에 부합하는 탐색이 가능하도록 하였다.

또한, PSO의 수렴에 중요한 역할을 하는 관성하중 w 를 비선형적으로 감소하도록 설정하여 세대초기와 말기에 최적해를 잘 탐색할 수 있도록 하였다.

단자전압의 단위계단 응답에서 제안한 방법으로 설계된 PSO-PID 제어기는 주어진 제약조건을 모두 만족시켰을 뿐만 아니라, 동시에 정량적인 기준인 M_p , t_s , t_r , e_{ss} 에서 기존의 연구보다 양호한 결과를 보임을 확인하였다.

References

- [1] P. Kunder, N. J. Balu, M. G. lauby, Power System Stability and Control, Vol.7, McGraw-Hill, New York, 1994
- [2] H. Panagopoulos, K. J. Åström, T. Hägglund, "Design of PID Controllers Based on Constrained Optimization", *IEE Proceedings of Control Theory Application*, Vol.149, No.1, pp.32-40, 2002.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1049/ip-cta:20020102>
- [3] R. C. Panda, "Synthesis of PID controller for unstable and integrating processes", *Chemical Engineering Science*, Vol.64, No.12, pp.2807 - 2816, 2009.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2009.02.051>
- [4] M. A. Johnson and M. H. Moradi, PID Control: New Identification and Design Methods, Chapter 2, Springer, London, UK, 2005.
- [5] U. S. Banu, G. Uma, "Fuzzy Gain Scheduled Continuous Stirred Tank Reactor with Particle Swarm Optimization Based PID Control Minimizing Integral Square Error", *Instrumentation Science and Technology*, Vol.36, No.4, pp.394 - 409, 2008.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1080/10739140802151499>
- [6] M. S. Arumugam, M. V. C. Rao, "On the performance of the particle swarm optimization algorithm with various inertia weight variants for computing optimal control of a class of hybrid systems", *Discrete Dynamics in Nature and Society*, Vol.2006, Article ID 79295, pp.1-17, 2006.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1155/DDNS/2006/79295>
- [7] M. S. Arumugam and M. V. C. Rao, "On the optimal control of single-stage hybrid manufacturing systems via novel and different variants of particle swarm optimization algorithm", *Discrete Dynamics in Nature and Society*, Vol.2005, No.3, pp.257 - 279, 2005.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1155/DDNS.2005.257>
- [8] R. M. Chen, C. M. Wang, "Project Scheduling Heuristics Based Standard PSO for Task-resource Assignment in Heterogeneous Grid", *Abstract and Applied Analysis*,

- Vol.2011, Article ID 589862, pp.1-20, 2011.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1155/2011/589862>
- [9] R. F. Abdel-Kader, "Particle Swarm Optimization for Constrained Instruction scheduling", *VLSI Design*, Vol.2008, Article ID 930610, pp.1-7, 2008.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1155/2008/930610>
- [10] S. M. G. Kumar, R. Jain, N. Anantharaman, V. Dharmalingam, K. M. M. S. Begum, "Genetic Algorithm Based PID Controller Tuning for a Model Bioreactor," *Indian Institute of Chemical Engineers*, Vol.50, No.3, pp.214 - 226, 2008.
- [11] I. Chiha, N. Liouane, P. Borne, "Tuning PID Controller Using Multiobjective Ant Colony Optimization", *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, Vol.2012, Article ID 536326, pp.1-7, 2012.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1155/2012/536326>
- [12] V. Rajinikanth, K. Latha, "Bacterial Foraging Optimization Algorithm Based PID Controller Tuning for Time Delayed Unstable Systems", *Mediterranean Journal of Measurement and Control*, Vol.7, No.1, pp.197 - 203, 2011.
- [13] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization", *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, Vol.4, Perth, Australia, pp.1942 - 1948, 1995.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- [14] Y. Shi, R. Eberhart, "A Modified Particle Swarm Optimizer", *1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No.98TH8360)*, Anchorage, USA, pp.69 - 73, 1998.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/icc.1998.699146>
- [15] Y. Shi, R. C. Eberhart, "Empirical Study of Particle Swarm Optimization", *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406)*, Washington, DC, Vol.3, pp.1945 - 1950, 1999.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/cec.1999.785511>
- [16] R. C. Eberhart, Y. Shi, "Comparison between Genetic Algorithms and Particle Swarm Optimization", *Evolutionary Programming VII*, pp.611 - 616, 1998.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/bfb0040812>
- [17] P. J. Angeline, "Using Selection to Improve Particle Swarm Optimization," *1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No.98TH8360)*, Anchorage, USA, pp.84 - 89, 1998.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/icc.1998.699327>
- [18] H. Yoshida, K. Kawata, Y. Fukuyama, "A Particle Swarm Optimization for Reactive Power and Voltage Control Considering Voltage Security Assessment," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.15, No.4, pp.1232 - 1239, 2000.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/59.898095>
- [19] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, TMH, 8th reprint, 2009.
- [20] O.I. Elgerd, *Electric Energy Systems Theory. An Introduction*, Tata McGraw-Hill, New Delhi, 1983.
- [21] F. M. Miavagh, E. A. A. Miavaghi, A. R. Ghiasi, M. Asadollahi, "Applying of PID, FPID, TID and ITID controllers on AVR system using particle swarm optimization (PSO)", *2015 2nd International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KB EI)*, Tehran, Iran, pp.866-871, 2015.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/kbei.2015.7436157>
- [22] S. Panda, B. K. Sahu, P. K. Mohanty, "Design and performance analysis of PID controller for an automatic voltage regulator system using simplified particle swarm optimization", *Journal of the Franklin Institute*, Vol.349, No.8, pp.2609-2625, 2012.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jfranklin.2012.06.008>
- [23] H. Gozde, M. C. Taplamacioglu, M. Ari, "Automatic Voltage Regulator(AVR) design with Chaotic Particle Swarm Optimization", *Proceedings of the 2014 6th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, pp.23-26, 2014.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/ecai.2014.7090158>
- [24] H. Zhu, L. Li, Y. Zhao, Y. Guo, Y. Yang, "CAS algorithm-based optimum design of PID controller in AVR system", *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol.42, No.2, pp.792-800, 2009.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.chaos.2009.02.006>

이 윤 형(Yun-Hyung Lee)

[정회원]



- 2004년 2월 : 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과 (공학석사)
- 2007년 8월 : 한국해양대학교 대학원 메카트로닉스공학과 (공학박사)
- 2008년 2월 ~ 2014년 6월 : 한국항만연수원 교수
- 2014년 7월 ~ 현재 : 한국해양수산연수원 교수

<관심분야>

유전알고리즘 이론 및 응용, 퍼지제어, 비선형제어, 시스템식별, 선박 전기 및 제어시스템