

진화전략에 의한 PI제어기의 스폿용접기에 관한 연구

김재문*, 김연충*, 원충연*, 김규식**

*성균관대학교 전기공학과, **서울시립대학교 제어계측공학과

A Study on Spot Welder of PI Controller Using Evolution Strategy

Kim, Jae-Mun* Kim, Yuen-Chung* Won, Chung-Yuen* Kim, Gyu-Sik**

* Dept. of Electrical Eng. Sung Kyun Kwan Univ.

** Dept of Control & Instrumen. Eng. Seoul City Univ.

Abstract

PI(proportional-integral) controller has been extensively used in the industrial field. But in practice case, it is difficult to tune PI gains. Evolution Strategy(ES) is used as an effective search algorithm in optimization programs. In this paper we proposed a PI controller for Spot welder system using ES with varying search space. ES with varying search space which depends on fitness values at each generation is used to tune PI control parameters. Simulation results show the proposed algorithm has accurate and robust performance with effective search ability.

1. 서론

PI 제어기는 산업현장에서 가장 광범위하게 이용되고 있는 제어 기법 중 하나이다. PI 제어기는 제어상수값이 적절히 조절될 경우 좋은 운전 특성을 얻을 수 있으며 제어알고리즘이 간단하여 손쉽게 구현할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 최적의 제어상수값을 얻기 힘들 뿐만 아니라 운전점이나 파라미터가 변하는 경우 그 제어상수값을 다시 조정해야 하는 문제점들이 있다[1].

본 연구에서는 간단한 자연진화의 원리를 모방한 ES(Evolution Strategy)를 이용하여 온라인으로 PI제어기의 이득을 자동 조정하는 새로운 알고리즘을 제안한다. ES는 EA(Evolution Algorithm)의 한 종류로서 그 개체가 부동소수점으로 표현되는 특징을 가지고 있으며 최적점을 탐색하는데 있어서 매우 효과적인 방법이다[2][3].

제시된 알고리즘은 진화의 초기단계에서 광범위한 탐색영역을 가지도록 하며 점차 그 탐색영역을 줄여나가는 가변 확률분포를 가지는 ES이다. 본 연구에서는 용접품질의 성능향상을 위해 ES-PI제어 스폿용접기에 적용되었고 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 입증하였다.

2. ES-PI제어에 의한 스폿용접 시스템

ES는 파라미터 최적화 문제를 풀기 위하여 자연진화의 원리를 모방한 알고리즘으로서 연속적으로 파라미터가 변화하는 여러가지 최적화 문제에 적용되어져 왔다. ES에서 각 개체의 표현은 2진수로 표현되는 GA(Genetic Algorithm)와는 다르게 부동소수점 벡터형 ($V=(X, \sigma)$)으로 개체를 표현한다. 여기서 X는 탐색공간의 한점을 나타내며 σ 는 표준편차 벡터이다. 이렇게 선정된 초기 개체는 식 (1)과 같이 표현되는 돌연변이에 의하여 진화하여 자손을 생성한다.

$$X^{i+1} = X^i + M(0, \sigma) \quad (1)$$

여기서, $M(0, \sigma)$ 는 평균이 0이고 표준편차가 σ 인 independent random Gaussian number vector

이며 만약 자손(X^{i+1})의 적합도가 부모(X^i)보다 우수하고 제약 조건을 만족한다면 자손은 개체집단의 새로운 구성원으로 채택되며 부모를 대체한다.

한편 ES를 실제 시스템에 적용하는데 있어서 큰 제약점으로 수렴속도의 문제가 있는데 최근 여러 가지 해법이 제시되고 있다[2].

본 연구에서는 수렴속도를 최적화하기 위해 탐색영역을 적합도의 변화에 따라 가변시키는 가변 표준편차를 도입하였다. 자손세대의 각 개체는 식 (2)를 이용하여 진화하게 된다.

$$NEW = ZOOM \times RN + OLD \quad (2)$$

여기서 RN 은 가우시안 랜덤변수

ZOOM은 식(3)과 같이 진화가 진행됨에 따라 가변되는 변수이다.

$$ZOOM = \begin{cases} b - a \times \frac{MAX}{c} & \text{if } MAX < d \\ \frac{c}{(MAX - AVG)} & \text{if } MAX \geq d \end{cases} \quad (3)$$

여기서 a, b, c는 양의 정수, MAX는 최대 적합도, AVG는 평균 적합도를 나타낸다.

탐색초기에 최고적합도는 매우 작다. 따라서 식(3)의 첫 번째 식을 따라 변화하게 되고 이것은 탐색공간이 크다는 것을 의미한다. 한편 탐색이 진행되면 최고적합도는 크지고 ZOOM은 점점 작아진다. 따라서 탐색 단계가 작아져 정확도를 개선시킬수 있으며, 평균적합도와 최고적합도와의 차이가 작아지면 이것은 국부적 최저점에 도달했다는 것을 의미하며 뒷의 두 번째 항은 이 문제를 해결해준다.

한편 본 연구에서 PI제어기의 각 파라미터는 ES에서 부동소수점으로 부호화된 각 개체로 표현된다.

$$\text{개체} \quad \begin{matrix} Kp(k) & Ki(k) \end{matrix}$$

여기서 $Kp(k)$: 비례이득, $Ki(k)$: 적분이득

또한 제어기 파라미터를 조정하기 위한 적합도 함수는 식 (4)와 같이 정의하였다.

$$fitness(i) = \frac{1}{1 + a \sum_{j=1}^m |e_j(i)|} \quad (4)$$

여기서 a는 상수, m은 전체 샘플링 수, 그리고 $e_j(i)$ 는 j번째 개체에 대한 i번째 샘플링 시점에서의 오차값이다.

식(4)의 분모항중 두 번째항은 오차를 최소화하기 위하여 도입되었다. 그럼 1은 제안된 제어 시스템의 불특도를 나타낸다.

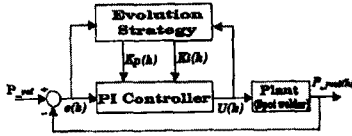


그림 1. 제안된 시스템 블록도

3. 시스템 구성 및 정전력제어의 선형화

본 연구에서 사용한 스푹용접 시스템의 구성도는 그림2와 같다. 그림 2의 정전력 제어 시스템의 변압기 모델은 이상적인 변압기로 가정하였고 변압기 2차측은 RL 회로이고 부하단 저항이 변화하므로 동적방정식은 다음과 같다.

$$v_{2s}(t) = L \frac{di(t)}{dt} + R i(t) \quad (5)$$

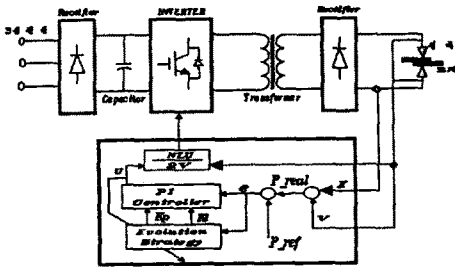


그림 2. 스푹 용접 시스템 블록도

한편, 전력제어기에 대한 동적 방정식은 식(6)과 같이 된다.

$$F(t) = v(t) i(t) \quad (6)$$

$$= R(i)^2(t)$$

$$e(t) = P^*(t) - F(t) \quad (7)$$

스푹용접기는 비선형 시스템이므로 제어기의 이득을 얻기 힘들고 각 동작점마다 동특성이 달라지며 응답특성의 예측이 어렵다. 따라서 용접전극의 양단의 저항 $R(t)$ 을 용접전류나 전압변수에 비해 동특성이 느린 매개변수로 볼 수 있으므로 상수 R 로 가정하고, 미분기하학 이론에 기초를 둔 비선형계환 선형화 기법을 도입하면 선형 시스템으로 제어된다[4][5]. 식(6)의 양변을 미분하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{F}(t) &= \dot{v}(t)i(t) + v(t)\dot{i}(t) \\ &= \frac{-2R}{L} F(t) + 2v_{2s}(t)v(t)/L \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)의 두 번째 항을 다음과 같이 정의하면, 식(9)과 같이 된다.

$$u = 2v_{2s}(t)v(t)/L \quad (9)$$

식(9)는 식(10)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\dot{F}(t) = \frac{-2R}{L} F(t) + u \quad (10)$$

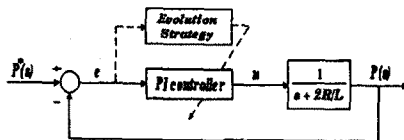


그림 3. 선형 시스템으로 바뀐 스푹용접기 블록도

4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 순서는 먼저 임의의 M개의 개체를 가진 개체집단을 생성하고 각 개체의 적합도를 계산한다. 그리고 식(3)을 실행하여 새로운 N개의 자손개체를 생성하고 각 개체의 적합도를 계산한다. 새롭게 생성된 자손개체는 부모세대의 M개의 각 개체와 적합도를 비교하여 전체 M+N개의 개체중 가장 큰 적합도를 가진 M개의 개체를 선택하여 새로운 개체집단을 생성하게 된다.

표 1. 시뮬레이션에 사용된 용접시스템 파라미터

입력전압	381[V]
변압기 1차 누설인덕턴스	78.9 μF
변압기 2차 누설인덕턴스	0.3 mF
변압기 자파 인덕턴스	10 mH
변압기 권수비	22.5
부하단 저항	60 - 110 μΩ
스위칭 주파수	1000 Hz

이렇게 하여 새로운 세대가 형성되며 진화하게 된다. 본 연구에서는 한 세대당 20개의 개체를 이용하였으며 각 개체는 PI제어기의 각 파라미터를 가지고 있으며, 새롭게 얻어진 각 파라미터는 PI 스푹용접기 전력제어 시스템을 위하여 이용되었다.

그림 4는 진화과정 동안 각 세대의 최고적합도와 평균적합도를 나타낸다. 진화가 진행됨에 따라 적합도가 증가함을 알 수 있다. 그림 5는 부하단의 저항변화를 보여주고 있으며, 그림 6은 10세대후의 PI제어기 이득에 대해 기준전력 10[KW]를 주었을 때 실제전력파형, 그림 7은 300세대후의 실제전력파형을 보여주고 있다. 300세대 후의 PI제어기 이득에 대해 기준전력을 주었을 때 과도응답특성이 양호함을 볼 수 있다.

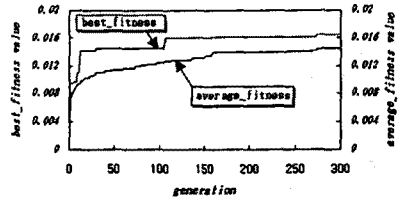


그림 4. 각 세대의 평균적합도와 최고 적합도

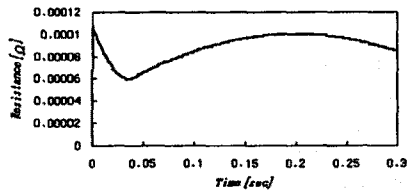


그림 5. 용접시 부하단 저항변화

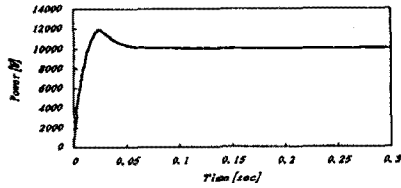


그림 6. 10세대 후 PI이득에 대한 실제전력파형

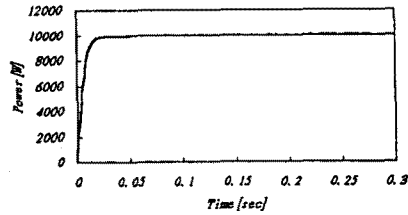


그림 7. 300세대 후 PI이득에 대한 실제전력파형

5. 결론

본 연구에서는 온라인 학습이 가능하고 가변탐색공간을 가진 진화 전략에 의한 PI제어의 스폿용접기 전력제어에 관하여 시뮬레이션하였다. 여기서 가변탐색공간을 가지는 진화전략은 스폿용접기 제어파라미터를 자동 조정하는데 이용되었다.

시뮬레이션 결과 진화전략을 이용하여 얻어진 제어 파라미터를 적용한 PI제어기를 이용한 경우 기준값에 도달하는 시간이 짧고 오버슈트가 작은 특성을 가짐을 알 수 있다. 제안된 알고리즘은 신경회로망에서 가중치 조정문제, 퍼지제어기의 퍼지함수조정 등에도 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

6. 참고문헌

- [1] Karl Johan Aström and Tore Hägglund, "Automatic tuning of PID Controllers", Instrument Society of America, 1988.
- [2] Zbigniew Michalewicz, "Genetic Algorithms + Data Structures=Evolution Programs", Springer-Verlag, 1994.
- [3] Takhiro Ota, Sigeru Omatu, "Tuning of the PID Control Gains by GA", Proceedings of the 1996 IEEE Conference on ETFA, 1996.
- [4] Gyu-sik kim, Chung-Yuen Won, You-Shik Shin, "Power Control of Resistance welding system via Feedback Linearization Technique", Vol. 2, pp. 749-752, ITC-CSCC'96, 1996.
- [5] 서문준, 김규식, 김재문, 원중연, "저항스폿용접 시스템의 고성능 전력제어", 대한 전자공학회, 추계종합학술대회, 1997.