전력전자학술대회 논문집 1999. 7.21-24

순시전력 제어를 통한 스폿용접기의 용접품질 향상

김재문*, 원충연*, 최규하**, 김규식***, 목형수**
*성균관대학교, **건국대학교, ***서울시립대학교

The Improvement of Welding Quality of Spot Welder Via an Instantaneous Power Control

J. M. Kim*, C. Y. Won*, G. H. Choi**, G. S. Kim***, M. S. Mok**
*Sung Kyun Kwan Univ., **Kon Kuk Univ., ***The Univ. of Seoul

Abstract

In this paper, the inverter spot welding system with high efficiency via an instantaneous power control is presented. In spot welding, instantaneous power control is utilized in order to attain less spatter and high welding performance. Also we proposed a PI controller for spot welder system using Evolution Strategy(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

1. 서 론

스폿 용접은 겹치기 저항 용접기의 한 종류로 두 개의 금속판을 서로 겹쳐서 양쪽에 전극으로 압력을 가하면서 많은 전류를 흘려 보낼 때 금속판 사이의 접촉저항에 의해 주울열이 발생하여 그 열로써 두 금속판을 접합하는 공정이다[1].

1877년 Elihu Thomson에 의해 발명된 용접공정으로 용접봉과 같은 첨가물이 없어서 용접 후에도 피용접물의 무게에 큰 변화가 없는 특징으로 인해 항공기 몸체, 자동차의 차체, 기타 군수품과 무기 등의 대량생산을 요하는 산업 생산라인에 많은 사용되고 있다.

최근의 스폿용접에 대한 연구동향을 살펴보면, 기계적인 측면에서 용접 중에 투입되는 에너지와 용접 중의 열 팽창으로 야기되는 전극의 분리현상을 이용하여 제어하는 연구가 활발히 진행되고 있으며[10][11], 전기적인 측면에서는 정전류 제어방식의 문제점이 대두되어 이를 보완하고자 최근에는 고품질을 요하는 용접공정에 인버터 전원방식을 이용하여 정전력 제어에 대한 연구가 이루어지고 있다[4].

본 논문에서는 필요이상의 전력이 용접부위에 공급되어 시스템 효율이 저하되고 필요이상으로 용접시간이 길게 설정되어 스패터가 발생하는 문제점을 해결하고자 순시전력 제어방식을 제안한다. 한편 제안한 방식에 대해 선형제어 이론을 접목시키고자 최근에 많이 연구가 이루어지고 있는 진화 전략(Evolution Strategies: 이하 ES)을 이용한 PI제어기의 최적 제어 상수값을 찾아내어 제어하는 알고리즘을 제시하였다.

2. 스폿 용접기의 원리 및 동저항 특성곡선

스폿용접은 그림 1과 같이 주울열을 이용하는 방법으로 금속판(피용접물)을 전극사이에 놓고 가압하면서 전류를 흘리면, 용접부는 주울열에 의해 가열되어 국부적으로 용융되고 피용접물은 접합된다.

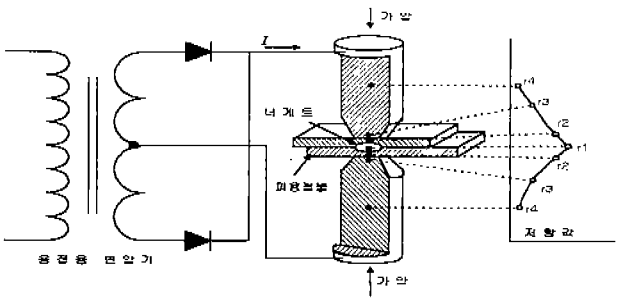

그림 1 스폿용접기의 원리 및 저항분포

용접저항 $R(\Omega)$, 용접전류 I (A), 용접시간 t (sec)에 대해 발열량 Q는 식 (2-1)과 같이 표현되고 이 열로

인해 국부적으로 용접부가 용융되면서 가압력에 의해 용접된다[1~4].

$$Q = 0.24\, I^2 Rt \ (\text{cal}) \qquad (2\text{-}1)$$

고유저항 $\rho(\Omega\text{-cm})$, 전류밀도 $\delta(A/cm^2)$ 일 때 단위 시간에 대한 체적당의 발열량 q는 식 (2-2)가 된다.

$$\frac{dq}{dt} = 0.24\rho\delta^2 \qquad (2\text{-}2)$$

식 (2-2)에서 시간에 대한 순시적인 발열량 q는 금속에 대한 고유저항과 용접부에 공급하는 전류밀도에 밀접한 상관관계가 있다.

그림 2는 용접을 하는 동안 일정 가압력 상태에서 피용접물의 전형적인 동저항 특성을 보여준다. 너게트가 형성되는 과정에서 부하단 저항이 용접시간에 따라 변하고 있는데 이것은 크게 접촉저항과 고유저항의 변화로 나눌 수 있다[3][7][22].

접촉저항은 피용접물 사이에 존재하는 접촉면의 저항으로 가압력과 접촉저항 R_c사이의 관계는 식 (2-3)과 같이 지수함수로 표현된다.

$$R_c = K\frac{1}{F^n} \qquad (2\text{-}3)$$

여기서, K, n : 피용접물과 표면상태에 따른 상수
F : 가압력

한편 용접이 진행됨에 따라 고유저항(체적저항)값이 증가함을 보여준다. 일반적으로 금속의 고유저항은 재질에 의한 변화뿐만 아니라 온도의 변화에 영향을 받는다. 온도가 $0°C$일 때의 고유저항 $\rho_o(\Omega\text{-cm})$, 저항의 온도계수 α, 온도 θ(℃)일 때의 고유저항 $\rho(\Omega\text{-cm})$는 식 (2-4)와 같이 표현된다.

$$\rho = \rho_o(1 + \alpha\theta) \qquad (2\text{-}4)$$

식 (2-4)에서 용접에 따른 주울열이 발생하면 용접부위의 온도가 올라가고, 고유저항이 증가하면 발열량이 증가하여 더욱 더 온도를 상승시킨다.

그림 2-2의 전형적인 동저항특성에 대해 세부적으로 살펴보면 용접초기는 접촉저항이 소멸하는 기간으로 불안정한 현상을 보이며, 이 기간이 끝나면 용접전류에 의한 주울열의 상승으로 식 (2-4)와 같이 온도상승과 함께 고유저항이 증가하면서 처음으로 변곡점($d^2R/dt^2 = 0$)인 부분에서 접촉면 일부가 용융하여 너게트가 형성된다. 이후 최대가 되는 저항값을 지나게 되면 접촉면이 넓어지기 때문에 주울열에 의한 온도상승은 더 이상 증가하지 못하고 용접부의 주위로 퍼져나가고 저항은 하강한다. 이후 용접시간이 필요이상으로 길거나 용접전류가 너무 큰 경우에 가압력을 더 이상 지탱하지 못해 스패터가 발생하여 동저항은 급격히 감소한다.

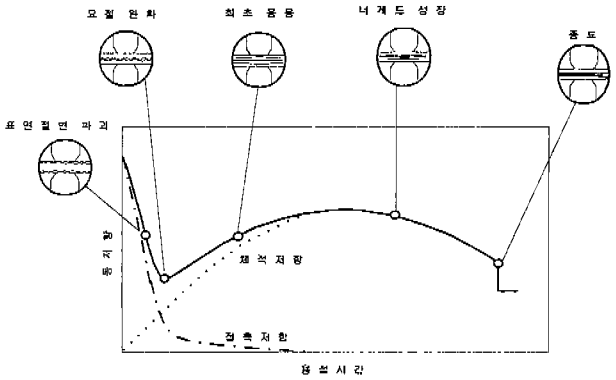

그림 2 전형적인 동저항 특성곡선

3. 스폿 용접 시스템의 선형화

용접부하단에 대한 등가회로는 아직까지 명확하게 제시되어 있지 않아 본 논문에서는 정전력 시스템에 대한 용접용 변압기와 용접부하단을 그림 3과 같이 모델링 하였다.

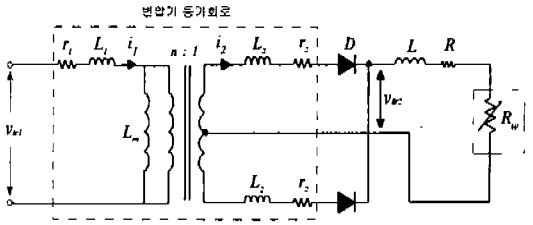

그림 3 용접용 변압기를 포함한 부하단 등가회로

스폿용접기는 부하단의 단락상태로 인한 저전압, 대전류 시스템으로 피용접물에서 검출되는 전압과 비교하면 변압기 2차측의 다이오드 전압강하를 무시할 수 없다. 따라서 다이오드 전압강하 $V_d(t)$를 고려한 변압기 2차측 동적 방정식은 식 (3-1), 식 (3-2)로 표현된다.

$$v_{tr2}(t) = v_{tr2}(t) - V_d(t) \qquad (3\text{-}1)$$

$$v_{tr2}(t) = L\frac{di_2(t)}{dt} + Ri_2(t) + R_w(t)\, i_2(t) = v_{tr1}(t)/N \qquad (3\text{-}2)$$

한편 용접하는 동안 부하(피용접물)에서 검출되는 순시전력 $P_{real}(t)$는 식 (3-3)과 같다.

$$P_{real}(t) = v_w(t)\, i_2(t) = R_w(t)\, i_2(t)^2 \quad (3\text{-}3)$$

스폿용접기는 비선형 구조를 갖고 있으므로 미분기하학 이론에 기초를 둔 비선형궤환 선형화 기법을 응용함으로써 선형시스템으로 만들어 제어하고자 한다[4][6].

식 (3-3)의 양변을 미분하면 식 (3-4)와 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\dot{P}_{real}(t) = \dot{v}_w(t)\, i_2(t) + v_w(t)\, \dot{i}_2(t) = -\frac{2(R+R_w(t))}{L} P_{real}(t) + 2v_{tr2}(t)v_x(t)/L \quad (3\text{-}4)$$

한편 PI제어기에서 출력되어 전력변환기로 들어가는 입력을 $\hat{u}(t)$, 전력변환기의 이득이 K라고 하면 다이오드 전압강하를 고려한 변압기 2차측 전압은 식 (3-5)와 같다.

$$v_{tr2}(t) = \frac{\hat{u}(t)\, K}{N} \quad (3\text{-}5)$$

식 (3-5)를 식 (3-4)에 대입하면

$$\dot{P}_{real}(t) = -\frac{2(R+R_w(t))}{L} P_{real}(t) + \frac{2Kv_w(t)}{LN}\hat{u}(t) \quad (3\text{-}6)$$

식 (3-6)에서 새로운 입력 $\bar{u}$ 를 식 (3-7)과 같이 정의하면

$$\bar{u}(t) = 2Kv_w(t)\,\hat{u}(t)/NL \quad (3\text{-}7)$$

식 (3-4)는 식 (3-8)과 같이 표현된다.

$$\dot{P}_{real}(t) = -\frac{2(R+R_w)}{L} P_{real}(t) + \bar{u}(t) \quad (3\text{-}8)$$

식 (3-3) ~ 식 (3-8)으로부터 보상된 식 (3-7)이 적용될 때 스폿용접기는 선형화되고 선형화된 모델은 시스템의 각 동작점에서 독립적이다. 선형화가 이루어진 후, 가장 중요한 문제는 보상된 식이 실제적으로 실현되는지를 고려해야 한다. 식 (3-7)에서 $v_w(t)$는 피용접물에 인가된 전압이므로 측정 가능한 변수로 새로운 제어입력 $\bar{u}(t)$는 실현 가능하다.

식 (3-3)~ 식 (3-8)를 통해 선형화된 정전력 제어 시스템의 블록선도가 그림 4와 같다.

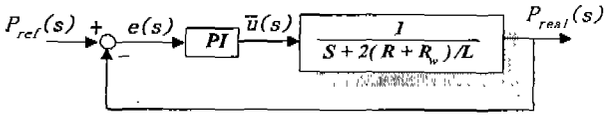

그림 4 선형 시스템으로 바뀐 볼록선도

4. PI제어기의 최적 제어이득값 탐색

진화 전략은 연속적으로 파라미터가 변화하는 최적화 문제를 풀기 위하여 자연진화의 원리를 모방한 알고리즘으로 1960년대 독일에서 개발되었다. 부동소수점 값을 갖는 벡터들의 쌍, 즉 $V=(X,\sigma)$으로 하나의 개체를 표현한다. 여기서 첫 번째 벡터 X는 탐색 공간내의 한 점을 나타내며, 벡터 σ는 표준편차 벡터이다. 이 때 돌연변이에 의한 다음 세대의 개체는 다음과 같이 표현된다[5].

$$X^{t+1} = X^t + N(0,\sigma) \quad (4\text{-}1)$$

여기서 $N(0,\sigma)$는 평균이 0이고 표준편차가 σ인 독립적인 램덤 가우시안 숫자들의 벡터이다.

만약 돌연변이 연산을 통한 자손세대의 적합도가 더 우수하고 제약조건을 만족한다면 개체집단내의 부모세대와 바뀌어 새로운 구성원으로 채택된다.

한편, ES를 실제 시스템에 적용하는데 있어서 큰 제약점으로 수렴속도의 문제가 있는데 본 논문에서는 수렴속도를 최적화하기 위해 탐색영역을 적합도의 변화에 따라 가변시키는 가변 표준편차를 도입하였다. 자손세대의 각 개체는 식 (4-2)을 이용하여 진화된다.

$$NEW = ZOOM \times RN + OLD \quad (4\text{-}2)$$

여기서 RN은 가우시안 랜덤변수이고 $ZOOM$은 식 (4-3)과 같이 가변되는 변수이다.

$$ZOOM = \begin{bmatrix} b - a \times MAX & \text{if } MAX < d \\ \dfrac{c}{(MAX - AVG)} & \text{if } MAX \geq d \end{bmatrix} \quad (4\text{-}3)$$

여기서 a, b, c, d 는 양의 정수, MAX는 최대 적합도, AVG는 평균 적합도를 나타낸다. 탐색초기에 최대 적합도는 매우 작다. 따라서 식 (4-3)의 첫 번째 식을 따라 변화하게 되어 $ZOOM$ 변수가 커지는데 이것은 탐색영역 공간이 크다는 것을 의미하며, 세대가 진행될수록 탐색영역이 변화를 가져오는데 최대 적합도는 커지고 $ZOOM$ 변수는 점점 작아진다. 따라서 탐색영역 공간이 작아져 정확도를 개선시킬 수 있다.

한편 개체는 ES에서 부동소수점으로 부호화되어 표현되는데 아래와 같이 PI제어기의 각 제어기 이득을 포함하고 있으며 이를 조정하기 위한 적합도 함수는 식 (4-4)와 같이 정의하였다.

개체	$K_p(k)$	$K_i(k)$

$$fitness(k) = \frac{1}{1 + a\sum_{i=1}^{m} |e_k(i)|} \quad (4\text{-}4)$$

여기서 a는 상수, m 은 전체 샘플링 수, $e_k(i)$는 k 번째 개체에 대한 i번째 샘플링 시점에서의 오차값이다. 식 (4-4)의 분모항 중 두 번째항은 오차를 최소화하기 위하여 도입되었다.

5. 모의 실험

PI제어기의 이득값은 세대가 진행되면서 학습을 통해 ES에서 구해지며, 제어기에서 출력된 제어량은 선형화기법을 통해 얻은 값들과 연산을 한 후 삼각파 비교방식을 통해 인버터를 구동한다. 전력제어를 위해 사용된 데이터와 매개변수는 표 1과 같다.

표 1. 사용된 데이터와 매개변수

전원전압		3상 220[V]
변압기 권수비	n	66.67
부하단 저항	R_w	500~1500 $\mu\Omega$
2차측 기생 인덕턴스	L	1 uH
2차측 기생저항	R	0.01 Ω
스위칭주파수	f	2 ㎑

또한 전체적인 용접 시퀀스에서 순시전력 제어시의 압력조건은 일정하다고 가정하였다[2]. 그림 5는 진화과정 동안 각 세대의 최대 적합도와 평균 적합도를 나타내며 적합도의 크기는 식 (4-4)에 의해 표현된다. 진화가 진행됨에 따른 적합도의 증가는 인버터 스폿용접기에서 PI제어기의 이득값을 적절하게 찾아나감을 보여준다. 그림 6은 용접 진행중에 용접모재인 순수한 철(Fe)에 대한 전형적인 저항변화를 보여주고 있으며, 그림 7은 기존의 정전력 제어를 했을 때 기준전력 1500[W]에 대한 전력응답 파형을 보여준다. 그림 8은 그림 7에 대해 부하단에 인가된 전압과 전류응답 파형을 보여준다. 용접후반부에 전압이 떨어짐으로 인해 용접전류가 상승하고 있는데 이는 일정 가압에 대해 스패터가 발생하거나 필요이상이 용접전력을 공급함으로써 시스템 효율을 떨어뜨린다.

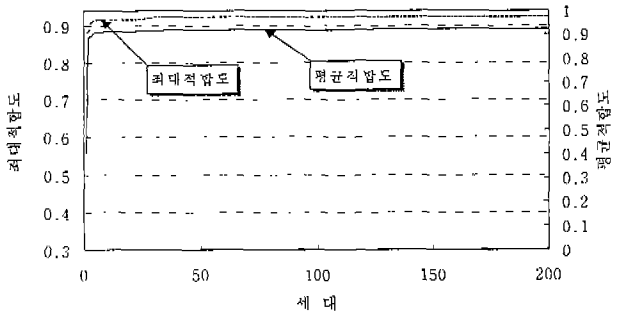

그림 5 각 세대의 평균 적합도와 최대 적합도

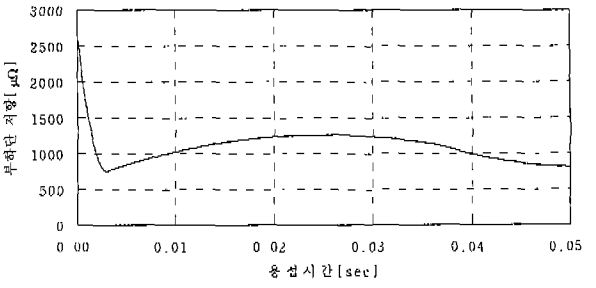

그림 6 용접중의 부하단 저항변화

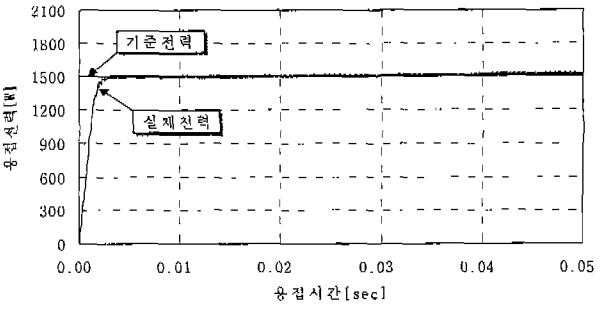

그림 7 기존의 정전력 제어

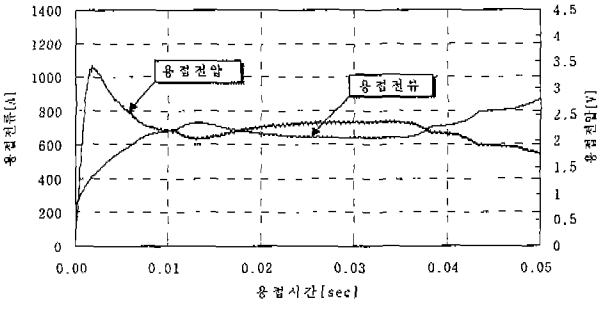

그림 8 부하단 전압 및 전류(정전력 제어)

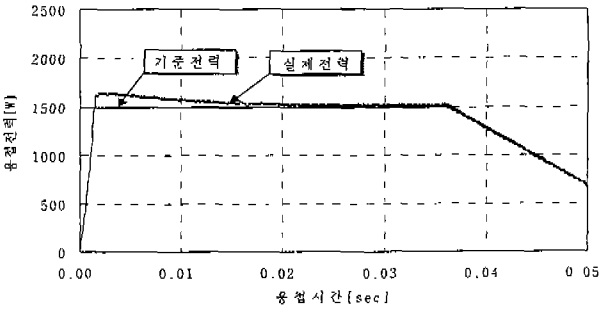

그림 9 5세대 후의 PI 이득에 대한 전력응답

그림 9는 5세대가 지난 후의 PI제어기에 대한 순시전력 응답파형을 보여주고 있는데 오버슛이 발생하고 정상상태에 도달하는 시간이 매우 늦다. 그림 10은 50세대가 지난 후의 PI제어기에 대한 순시전력 응답파형을 보여주며 그림 9에 비해 정정시간에 도달하는 속도가 매우 빠름을 알 수 있다. 그림 11은 변압기 1

차측 전압과 전류파형을 보여준다. 부하변화에 따라 인버터단에 흐르는 전류값이 순시적으로 변하고 스위치의 역병렬 다이오드를 통해 전원측으로 전류가 환원되고 있음을 볼 수 있다.

그림 12는 그림 10에 대해 부하에 인가된 전압과 전류응답 파형을 보여준다. 그림 8과 비교하면 용접후반부에 기준전력을 낮추어 줌으로써 상승하는 전류를 억제하고 있음을 알 수 있다. 따라서 용접후반부에 전류가 상승되는 시점에서 기준전력을 낮추어 과대한 전류로 인한 스패터를 줄이고 용접성능을 향상시킨다.

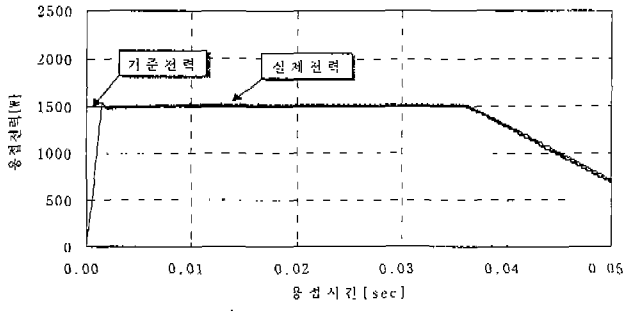

그림 10 50세대 후의 PI 이득에 대한 전력응답

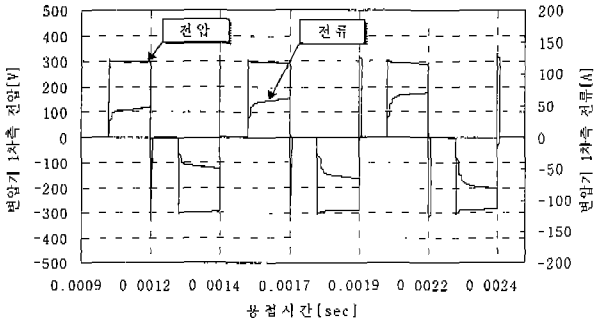

그림 11 전압, 전류 부분 파형

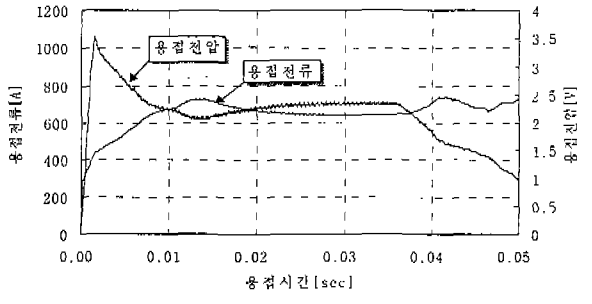

그림 12 부하단 전압 및 전류(순시전력 제어)

6. 결 론

본 논문에서는 인버터 스폿용접기의 정전력 제어방식과 제안한 순시전력 제어방식을 비교·고찰하였다. 정전력 제어방식은 용접시간이 길게 설정되면 용접후반부에 용접전류가 많이 흘러 스패터가 발생한다. 너게트는 동저항값이 최대점을 지나면 너게트 성장이 거의 끝나 불필요한 전력을 피용접물에 공급하게 되어 시스템 성능이 떨어진다. 그러므로 순시전력 제어에서 PI제어기의 이득설정에 어려움이 있으므로 이를 해결하기 위해 가변탐색 공간영역에서 적절한 제어이득 파라미터를 찾는 진화 전략를 이용하였다. 또한 동저항값이 최대가 되는 점까지 정전력 제어를 하고 이후 전력을 서서히 낮추어 스패터를 저감시키고 용접성능을 향상시키고자 하였다.

모의실험 결과, 진화전략을 이용하여 얻어진 제어기의 제어이득을 사용한 경우 세대가 진행됨에 따라 기준값에 도달하는 정정시간이 짧고 오버슛이 작은 특성을 가지므로 용접성능 향상을 기대할 수 있다.

본 연구는 한국과학재단 1997년도 특정기초 연구비(97-01-01-01-01-3)지원에 의하여 연구되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] S.A. Gedeon, C.D. Sorensen, K.T.Ulrich and T.W. Eagar, "Measurement of Dynamic Electrical and Mechanical Properties of Resistance Spot Welds", Welding Journal, pp.378_s ~ 385_s, Dec. 1987

[2] Chang H. S., Cho Y. J., Choi S. G., and Cho H. S., "A Proportional-Integral Controller for Resistance Spot Welding using Nugget Expansion", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 111, No. 2, pp.332-336, June 1989

[3] D.W. Dickinson, J.E. Franklin and A. Stanya, "Characterization of Spot Welding Behavior by Dynamic Electrical Parameter Monitoring", Welding Journal, pp. 170_s~176_s, June 1980

[4] Jun Seo-Moon, Gyu-Sik Kim, Jae-Mun Kim, Chung-Yuen Won, "Power Control of Resistance Spot Welding System with High Dynamic Performance", IECON' 97, pp. 845 ~ 849, 1997

[5] Zbigniew Michalewicz, "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs", Springer-Verlag, 1994

[6] Youyi Wang, David J. Hill, Richard H. Middleton, Long Gao, "Transient Stability Enhancement and voltage regulation of Power Systems", IEEE Trans on Power Systems, Vol. 8, No. 2, pp. 620-627, May 1993