

인버터 스폿 용접의 용접성능 향상을 위한 연구

(A Study on the Improvement of Welding Performance of the Inverter Spot Welders)

西門俊*, 金奎植*, 金才文**, 元忠淵**

(Jun Seomun, Gyu-Sik Kim, Jae-Mun Kim, and Chung-Yuen Won)

요 약

기술의 발전에 따라 저항스폿 용접의 용접성능 향상을 위한 다양한 제어기법들이 개발되었는데 이 중 정전류 제어방식은 용접공정중에 용접 시편의 동저항 특성에 따른 전류밀도의 변화를 일정하게 유지시키지 못해 스파터(spatter)가 많이 발생한다. 이를 보완하기 위해 정전력 제어가 도입되었으나, 이 역시 비선형 시스템이며 제어기의 이득조정(gain tuning)이 쉽지 않은 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 비선형폐환 선형화기법에 기초한 정전력 제어 알고리즘을 제안하고 그 유용성을 알아본다.

Abstract

In this paper, we attempt to control the nonlinear power system for resistance spot welders to be a fully linearized system by applying the recently developed nonlinear feedback linearization techniques. The controller proposed in this paper is computationally simple. In addition, the easy gain tuning as well as the high dynamic performance of resistance spot welding systems can be obtained simultaneously. To illustrate the dynamic performance of our controller further, we present some simulation results.

I. 서 론

저항스폿용접(resistance spot welding)은 1877년 미국의 Elihu Thomson에 의해 발명된 용접공정으로 그림 1에서와 같이 두 금속판을 전극 사이에 놓고 압력을 가하면서 0.3초 내외의 짧은 시간에 수천 암페어의 대전류를 흘려서 금속판 사이의 접촉저항으로 주울(Joule)열을 발생시켜 너겟(nugget)이 형성되도록

하는 전기저항용접의 일종이다.

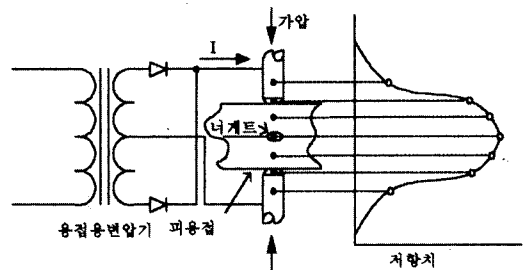


그림 1. 스폿용접의 원리 및 저항분포
Fig. 1. The principle of spot welding and resistance distribution.

* 正會員, 서울市立大學校 制御計測工學科
(Dept. of Control and Instrumentation Eng., The University of Seoul)

** 正會員, 成均館大學校 電氣工學科
(Dept. of Electrical Eng. Sung Kyun Kwan University)

接受日字:1998年3月16日, 수정완료일:1998年5月28日

기술의 발전에 따라 이러한 저항 용접기를 제어하는 다양한 제어 기법들이 나오게 되었으나^[1-6] 이 중 기존의 정전류 제어방식은 그림 2에서와 같이 용접공정

중에 용접 시편의 동저항 특성에 따라 용접 부위에 가해지는 단위시간당의 전력 i^2R 이 일정하게 유지되지 않아 스파터(spatter)가 많이 발생한다. 이를 보완하기 위해 정전력 제어가 도입되었으나 이 역시 비선형 시스템이며 제어기의 이득조정(gain tuning)이 쉽지 않은 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 비선형계환 선형화기법^[7,8]에 기초한 정전력제어 알고리즘을 구현하고자 한다.

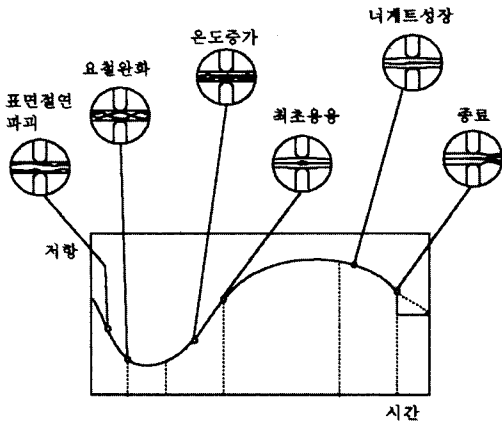


그림 2. 전형적인 동저항 특성 곡선
Fig. 2. The characteristic curve of typical dynamic resistance.

II. 정전력 제어기의 선형화

그림 3은 저항 스폿용접의 정전류 제어기에 대한 개괄적인 블록선도를 보여주고 있다. 정전류 제어 방식은 기존의 사이리스터를 이용한 스폿 용접기에서 주류를 이루어온 방식으로 정전력 방식과는 달리 피드백 된 전압이 불필요하여 비용 측면에서는 우수하다.

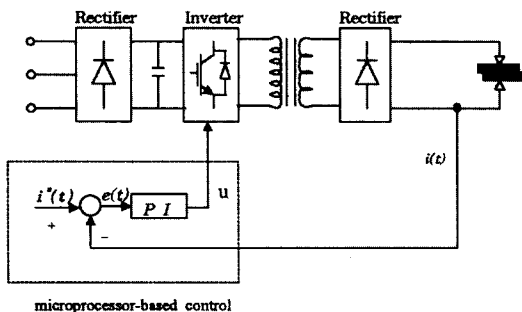


그림 3. 정전류 제어시스템의 블록선도
Fig. 3. Block diagram of the constant current control system.

그러나 그림 2와 같은 용접 부위의 동저항 변화 특성을 고려하지 않아 이때 용접 부위에 가해지는 단위시간 당 주을 열은 이 동저항 변화에 따라서 일정치 않다. 이것은 스파터 발생의 한 원인으로서 작용하게 되므로 용접 부위의 동저항이 용접 도중에 변하더라도 용접 부위에 가해지는 주을 열을 일정하게 유지하는 하나의 방법으로서 그림 4와 같은 정전력 제어기법이 나오게 되었다.

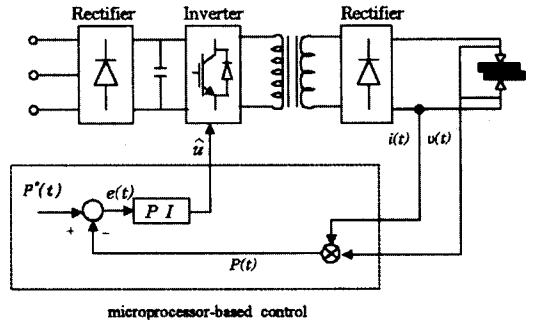


그림 4. 기존의 정전력 제어 시스템의 블록선도
Fig. 4. Block diagram of the conventional constant power control system.

그림 4의 정전력 제어 시스템을 모델링하기 위해서 그림 5와 같은 간단한 변압기와 부하 모델의 등가회로를 기본으로 식을 구해 본다.

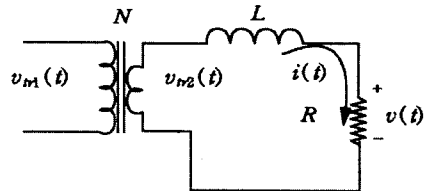


그림 5. 변압기와 부하모델의 등가회로
Fig. 5. Equivalent circuit of the ideal transformer and the load.

그림 5의 간단화된 변압기 모델로부터 2차측 동적 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 v_{m2}(t) &= L \frac{di(t)}{dt} + R i(t) \\
 &= v_{m1}(t)/N
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

또한 측정된 전력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 P(t) &= v(t) i(t) \\
 &= R i^2(t)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

식(2)의 양변을 미분하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{P}(t) &= \dot{v}(t) i(t) + v(t) \dot{i}(t) \\ &= (-R v(t) / L + R v_{v2}(t) / L) i(t) \\ &\quad + (-R i(t) / L + v_{v2}(t) / L) v(t) \\ &= -\frac{2R}{L} i(t) v(t) + 2 v_{v2}(t) v(t) / L \\ &= -\frac{2R}{L} P(t) + 2 v_{v2}(t) v(t) / L \end{aligned} \quad (3)$$

이때 그림 4에서 볼수 있듯이 PI 제어기를 나와 전력증폭기에 들어가는 입력을 \hat{u} 라 정의하면 변압기 1차측 전압은

$$v_{v1}(t) = \hat{u} K \quad (4)$$

가 되고 이때 변압기 2차측 전압은 다음과 같다.

$$v_{v2}(t) = \frac{\hat{u} K}{N} \quad (5)$$

이제 식 (5)를 식 (3)에 대입하면

$$\dot{P}(t) = -\frac{2R}{L} P(t) + \frac{2Kv(t)}{LN} \hat{u}(t) \quad (6)$$

이 되어 그림 4에 있는 기존의 정전력 제어기는 식 (6)에 있는 상태변수들의 곱 $v(t) \cdot \hat{u}(t)$ 에 의해 비선형 항을 갖는 것을 알 수 있다. 따라서 이 제어기는 이득 조정도 힘들뿐만 아니라 각 동작점마다 동특성이 달라지며 응답특성의 예측이 어렵다. 이러한 비선형성을 극복하기 위하여 본 연구에서는 비선형계환 선형화 기법을 응용함으로써 완전한 선형시스템으로 만들어 제어하고자 한다.

새로운 입력 \bar{u} 를 다음과 같이 정의하면,

$$\bar{u}(t) = 2 v_{v2}(t) v(t) / L \quad (7)$$

식 (3)은 다음과 같다.

$$\dot{P}(t) = -\frac{2R}{L} P(t) + \bar{u}(t) \quad (8)$$

식 (8)에서 \bar{u} 는 전력제어를 위한 입력이므로 PI 제어기를 채용하면 그림 6과 같다. 그림 6에서 새로운 입력 \bar{u} 를 시간축상에서 표현하면 다음과 같다.

$$\bar{u}(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt \quad (9)$$

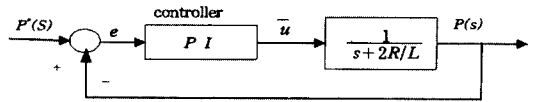


그림 6. 완전한 선형 전력제어 시스템으로 바뀐 블록선도

Fig. 6. Block diagram of the completely linearized power control system.

결국, 식 (3), (7), (9)로 구성된 폐루프 시스템이 그림 6에서와 같이 완전히 선형화된 것을 알 수 있다. 이제 식 (7)과 (9)를 이용하여 다음 식을 얻을 수 있다.

$$v_{v2}(t) = \frac{L}{2v(t)} (k_p e(t) + k_i \int e(t) dt) \quad (10)$$

그리고 식 (1)와 식 (10)을 이용하여 다음을 얻을 수 있다.

$$v_{v1}(t) = \frac{NL}{2v(t)} (k_p e(t) + k_i \int e(t) dt) \quad (11)$$

이때 전력증폭기 이득이 K 라면 PI 제어기의 출력값이 v_{v1} / K 임을 알 수 있다. 선형화된 정전력 제어시스템의 블록선도가 그림 7에 나와 있다. 그림 7에서 실제 시스템을 실현시 고려할 것중의 하나가 전압을 검출할 때 저역 통과 필터를 사용함으로써 생기는 시간 지연 효과이다. 이를 극복하기 위하여 용접전압 $v(s)$ 를 $v(s)/(1+s/a)$ 로 하면서 PI제어기 $(k_i + k_p s)/s$ 를 lead-lag 보상기와 적분제어기가 결합된 $[(k_i + k_p s)/(1+s/a)] \cdot (1/s)$ 형태로 처리하였다.

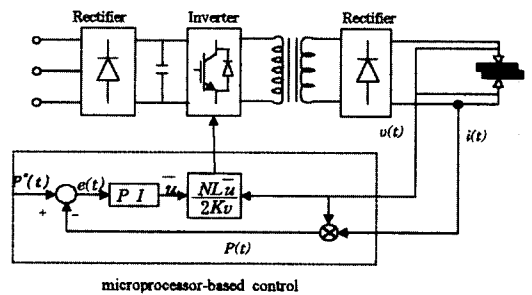


그림 7. 선형화된 정전력 제어 시스템의 블록선도

Fig. 7. The block diagram of linearized constant power control system.

III. 모의실험

앞서 제안한 본 제어 기법의 성능을 평가해보기 위

하여 몇가지 모의실험을 하였다. 모의실험을 위하여 그림 8과 같은 컨버터의 등가회로를 구성하였다. 컨버터의 데이터와 매개변수가 표 1에 있다.

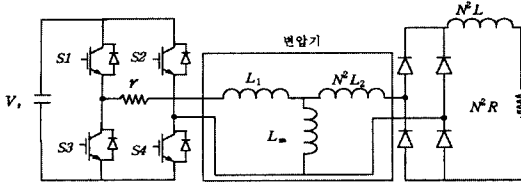


그림 8. 모의실험을 위해 근사화된 컨버터 회로
Fig. 8. Approximated form of the converter circuit adopted for simulation study.

표 1. 컨버터의 데이터와 매개변수
Table 1. Converter data and parameters.

DC 링크 전압	V_s	381 V
1차측 유효 저항	r	0.1 Ω
1차측 누설 인덕턴스	L_1	78.9 μH
2차측 누설 인덕턴스	L_2	0.3 nH
자화 인덕턴스	L_m	10 mH
부하 인덕턴스	L	100 μH
변압기 권선비	N	22.5
파우어 증폭기 이득	K	38.1
스위칭 주파수	f_s	1 KHz

먼저 그림 9와 같이 가정된 동저항 R 에 대해 본 연구에서 언급한 세가지 제어방식(그림 3, 그림 4, 그림 7)에 대한 모의실험 결과가 그림 10에 있다. 이 모의실험에서 정전력 명령 $P^*(t)$ 는 10 [KW], 정전류 명령 $i^*(t)$ 는 10 [KA]로 설정하였다. 그림 10에서 응답 속도를 비교하여 보면 제안된 선형화된 정전력 제어 시스템의 응답속도가 기존의 것보다 빠른 것을 알 수 있다. 이것은 제안된 정전력 제어가 선형화되었기 때문이다. 물리적 의미를 살피기 위해서 그림 7의 선형화된 정전력 제어시스템을 검토해 본다. 그림 4의 기존 정전력 제어기와 비교하면 PI제어기의 출력이 상수 $NL/2K$ 와 곱해지고 다시 이것을 두 전극 텅사이의 전압으로 나누게 된다. 그림 11에서 볼 수 있듯이 정전력 제어의 처음에는 전압 $v(t)$ 가 작게 된다. 즉 처음의 PI 제어기의 출력을 작은 $v(t)$ 로 나눠 매우 크게 만들고 시간이 흐름에 따라 $v(t)$ 도 증가하면 PI 제어기의 출력은 다시 줄어든다. 이것이 본 논문에서 제안된 정전력 제어 시스템의 응답 속도를 빠르게 한다.

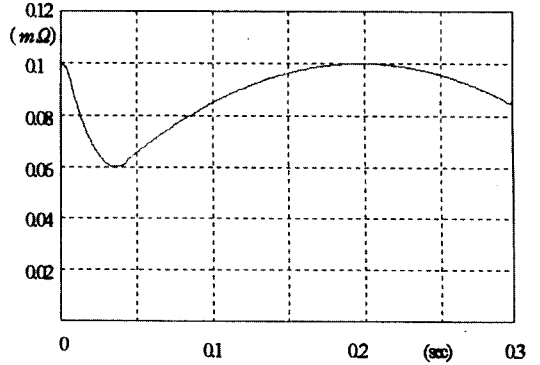


그림 9. 가정된 동저항 특성 곡선
Fig. 9. Assumed curve of load resistance.

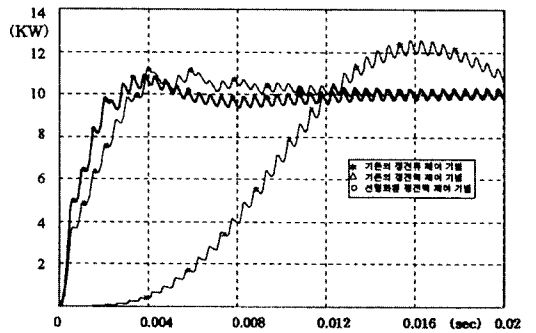


그림 10. 세가지 제어기법의 모의실험 결과
Fig. 10. Simulation results of the three control methods.

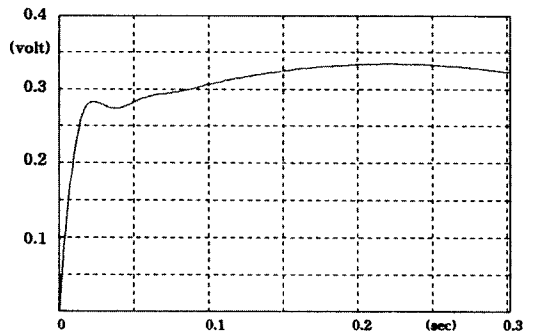


그림 11. 선형화된 정전력 제어기에서 저역 통과 필터된 $v(t)$ 의 응답곡선
Fig. 11. Low-pass filtered response of $v(t)$ in the linearized constant power control system.

IV. 결론

본 연구에서 제안하는 제어기에 의해 완전히 선형화

된 저항 스폿 용접용 정전력 제어 시스템을 얻을 수 있었다. 따라서 스폿 용접시 부하저항의 변동에도 불구하고 일정한 전력이 공급되어 전류밀도가 일정하고 스패터가 감소할 것으로 예측된다. 또한 선형시스템이기 때문에 제어기의 제어 이득을 쉽게 결정할 수 있을 뿐만 아니라 어떤 동작점에서도 선형응답 특성을 보이리라 예상된다. 따라서 선형시스템의 특징인 원하는 응답특성을 임의로 얻을 수 있는 장점이 있다. 향후, 용입 및 용접강도의 향상 등과 같은 용접 품질에 대한 성능 평가를 추진할 계획이다.

용어 및 약어

$P^*(t)$: 전력 설정치
$P(t)$: 전력 측정치 ($= v(t) i(t)$)
$v_{b1}(t)$: 변압기 1차측 전압
$v_{b2}(t)$: 변압기 2차측 전압
$v(t)$: 전극 팁양단 전압
$i(t)$: 변압기 2차측 전류
R	: 전극 팁양단 저항
L	: 변압기 2차측 인덕턴스
N	: 변압기 권선비 ($= N_1/N_2$)
K	: 파워 증폭기 이득(gain)
$k_p(k_i)$: 비례(적분) 이득 상수
u	: 정전류 시스템의 PI 제어기 출력
\hat{u}	: 기존 정전력 시스템의 PI 제어기 출력
\bar{u}	: 선형화된 정전력 시스템의 PI 제어기 출력

감사의 글

※ 본 연구는 1996년도 한국 학술진흥 재단의 지원에 의한 연구 결과의 일부입니다.

참고 문헌

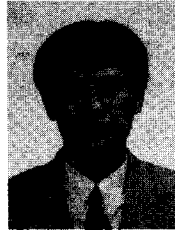
- [1] B. N. Waller and P. M. Knowlson, "Electrode separation applied for quality control in resistance welding," *Welding Journal*, vol. 44, no. 4, pp. 168-174, 1965.
- [2] W. F. Savage, E. F. Nippes, and F. A. Wassel, "Dynamic contact resistance of series spot welds," *Welding Journal*, vol. 57, no. 2, pp. 43-50, 1978.
- [3] D. W. Dickinson, J. E. Franklin, and A. Stanya, "Characterization of spot welding behavior by dynamic electrical parameter monitoring," *Welding Journal*, vol. 59, no. 6, pp. 170-176, 1980.
- [4] S. R. Patange, T. Anjaneyulu, and G. P. Reddy, "Microprocessor-based resistance welding monitor," *Welding Journal*, vol. 64, pp. 33-38, Dec., 1985.
- [5] Jun Seo-Moon, Gyu-Sik Kim, Jae-Mun Kim, and Chung-Yuen Won, "Power Control of Resistance Spot Welding System with High Dynamic Performance", *IEEE IECON' 97*, vol. 2, pp. 845-849, Nov., 1997.
- [6] 서 문준, 김 규식, 김 재문, 원 충연, "저항 스폿 용접 시스템의 고성능 전력 제어", *전자공학회 추계종합학술대회 논문집*, vol. 20, no. 2, pp. 1243-1246, 1997
- [7] I. J. Ha, "The standard decomposed system and noninteracting feedback control of nonlinear systems," *SIAM J. Contr. and Optim.*, vol. 26, pp. 1235-1249, 1988.
- [8] I. J. Ha, A. K. Tugcu, and N. M. Bostany, "Feedback linearizing control of vehicle longitudinal acceleration," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 34, no. 7, pp. 689-698, July, 1989.

저 자 소 개



西門俊(正會員)

1974년 전주태생. 1993년 3월 ~ 1997년 2월 서울시립대학교 제어계측공학과. 1997년 3월 ~ 현재 서울시립대학교 제어계측공학과 석사과정 재학중



金奎植(正會員)

1958년 천안태생. 1997년 3월 ~ 1981년 2월 서울대학교 전자공학과. 1981년 3월 ~ 1983년 2월 서울대학원 제어계측공학과 공학석사. 1985년 3월 ~ 1990년 8월 서울대학원 제어계측공학과 공학박사. 1988년 10월 ~ 1992년 8월 대우중공업 중앙연구소 전자기술부 선임연구원. 1993년 1월 ~ 현재 서울시립대학교 전자전기공학부 조교수



金才文(正會員)

1967년 9월 6일생. 1992년 성균관대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정



元忠淵(正會員)

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대학교 대학원 졸업(석사). 1987년 동 대학원 졸업(박사). 1991년 ~ 1992년 미국 테네시 주립대학 전기공학과 객원교수. 현재 성균관대 전기전자 및 컴퓨터공학부 교수