

지능제어 알고리즘을 이용한 펄스 인버터 TIG 용접기의 성능 향상

임용식*, 김규식*, 최규하**, 목형수**, 원충연***

*서울시립대학교 전자전기공학부, **전국대학교 전기공학과, ***성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터 공학부

Performance Improvement of TIG Welders Using Intelligent Control Algorithm

Yong-Sik Im*, Gyu-Sik Kim*, Gyu-Ha Choe**, Hyung-Soo Mok**, Chung-Yuen Won***

*Dept. of Electrical Engineering, University of Seoul,

**Dept. of Electrical Engineering, Kon Kuk University,

***School of Electrical Engineering, Sung Kyun Kwan University

ABSTRACT

Pulse inverter-type TIG(Tungsten Inert Gas) arc welders are studied to investigate the dynamic performance of welding. Welding currents are controlled to be pulse waveforms, resulting in stable arc and better welding performance. The hybrid-type controller is proposed to control the welding current. To demonstrate the practical significance of our results, we present some simulation results.

1. 서론

TIG 용접기에서 용접 전류를 제어하는데 있어서 일반적으로 생각할 수 있는 직류 전류 방식과 본 논문에서 제시하는 펄스 전류를 사용하는 경우를 생각할 수 있다. TIG 용접은 전류가 흐르는 회로를 순간적으로 끊을 때 공기의 절연 파괴가 일어나 전류가 공기 저항을 뚫고 방전을 하게 되는 아크(arc) 현상을 이용하는 방식이다. 따라서 최초의 스타트시에 고주파 아크 스타트 방식보다 직류 펄스 아크 스타트 방식이 유리하다. 실제 용접시의 에너지 효율에 대해서는 우선 입력 전원의 역할을 개선하는 것이 우선되어야 하고 다음으로는 아크의 파워를 개선해야 한다. 본 연구에서는 TIG 용접 전류에 있어서 직류 아크와 펄스 아크의 파워 관계를 분석한 다음, TIG 용접기를 모델링하여 여기에 두 가지 방식의 제어기를 사용한 최종 시뮬레이션을 통해 각 성능을 비교 분석하도록 한다. 또한, 가장 기본적인 직류 아크에 비해 우수한

펄스 아크에 의한 절전형 TIG 용접기를 구성하게 된다.

2. TIG 용접 시스템 구성

그림 1과 같은 TIG 용접 시스템에서 교류 전압을 브리지 다이오드를 통해 전파 정류한 후 인버터의 제어 신호(PWM)에 의해 고속 스위칭을 하고 이후 변압기를 거쳐 2차측 정류기를 거쳐 용접기 부하에 안정된 전원을 공급할 수 있다. 부하 전류를 피드백(feedback) 하여 제어기를 거쳐 원하는 출력 전류를 제어하게 된다. 본 논문에서는 일반적인 PID 제어기에 제어기 파라미터의 자동 튜닝으로 인한 향상된 제어를 위해 퍼지 제어 시스템을 혼합한 하이브리드(hybrid) 제어 방식을 사용하게 된다.

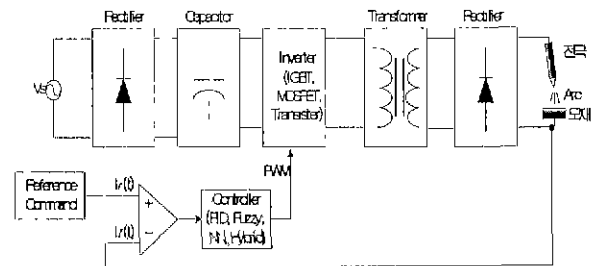


그림 1 TIG 용접기 블록 구성도
Fig. 1 The block diagram of TIG welders

용접 시스템 내부의 스위칭 소자의 안정된 동작을 유지하기 위해 동작주파수를 일반적으로 사용되는 20[kHz]를 사용하게 되고, 이 때 스너버 회로(snubber circuit)에서 발진주파수를 식 (1)과 같이

맞추도록 하였다. 이 회로 내부의 저항은 $5[k\Omega]$, 커패시터는 $0.01[\mu F]$ 으로 설정하면 PWM 출력 주파수가 동작주파수가 된다.

$$f_{osc} = \frac{1.1}{R \times C} \quad (1)$$

부하인 아르곤 아아크 기동의 전형적인 특성을 모델링하면 다음과 같다.

$$v = B_1 i + B_2 + B_3/i + B_4 L_a \quad (2)$$

식 (2)에서 v 는 아아크 양단에서 측정된 전압[V]이고, i 는 아아크 전류[A]이며, $B_1 \sim B_4$ 는 용접 환경 및 구조에 의해 결정되는 상수이다. L_a 는 모재와 텅스텐 전극사이의 간격[mm]이다. 다음 그림 2는 펄스전류의 일반적인 파형이다.

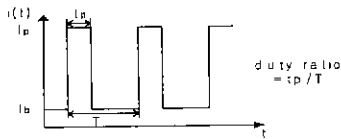


그림 2 펄스 아크 전류
Fig. 2 Pulse arc current

위의 구형파에 대한 실효치 전류는 다음과 같다.

$$I_{eff}^2 = \frac{1}{T} \left(\int_0^{\delta T} I_p^2 dt + \int_{\delta T}^T I_b^2 dt \right) \quad (3)$$

$$= \delta I_p^2 + (1-\delta) I_b^2$$

이 때 평균치 전류는 아래 식 (4)와 같다.

$$I_{avg} = \delta I_p + (1-\delta) I_b \quad (4)$$

펄스아아크에 전달된 평균파워어는 다음과 같이 실효치전류와 평균전류로 표현될 수 있다.

$$P_p = B_1 (I_{eff})^2 + (B_2 + B_4 L_a) I_{avg} + B_3 \quad (5)$$

일정한 전류의 펄스아아크 즉, I_c 에 전달된 평균파워어는 다음과 같다.

$$P_c = B_1 (I_c)^2 + (B_2 + B_4 L_a) I_c + B_3 \quad (6)$$

펄스아아크와 직류아아크가 같은 크기의 입력파워어를 갖는다고 하면 $P_p = P_c$ 이므로 식(5), (6)을 연립하면 듀티비(δ)는 다음과 같이 표현된다.

$$\delta = \frac{B_1 [(I_c)^2 - (I_p)^2] + (B_2 + B_4 L_a)(I_c - I_b)}{B_1 [(I_p)^2 - (I_b)^2] + (B_2 + B_4 L_a)(I_p - I_b)} \quad (7)$$

동일 공급 전력에 대해서 펄스아아크의 평균전류가 직류아아크의 전류보다 훨씬 적으므로 에너지 절약면에서 유리하다. 그림 2와 같은 펄스전류와 동일한 열량을 발생하기 위한 직류전류 I_c 는 다음 식 (8)을 만족해야 한다.

$$I_c^2 = I_p^2 + (1-\delta) I_b^2 \quad (0 < \delta < 1) \quad (8)$$

여기에서의 3가지 파라미터 즉, 직류전류가 정해질 때 펄스전류의 기저전류 I_b , 피크전류 I_p , 그리고 피크전류 듀티비인 δ 를 조절함으로써 직류전류시에 비해 같은 공급 전력에 대해서 에너지 절약면에서의 우수한 특성을 얻게 된다. 이러한 성분들의 적당한 쌍을 통한 펄스 전류를 제어하기 위해서 하이브리드 제어기를 사용한 제어부 회로를 그림 3과 같이 구성하였다. 이 방식^[6]에서는 기존의 PID 제어기에 퍼지 추론 시스템을 접목시켜 제어기 파라미터의 동적 변화를 구현하였다. 즉, 오차 및 오차의 미분 입력에 대한 퍼지 소속 함수의 값이 바뀔에 따라 결과적으로 비례 게인에 곱해지는 성분으로 사용되는 b의 값을 동적으로 변화시키게 된다. 이 성분은 시스템의 동적 특성에 맞게 최적으로 비

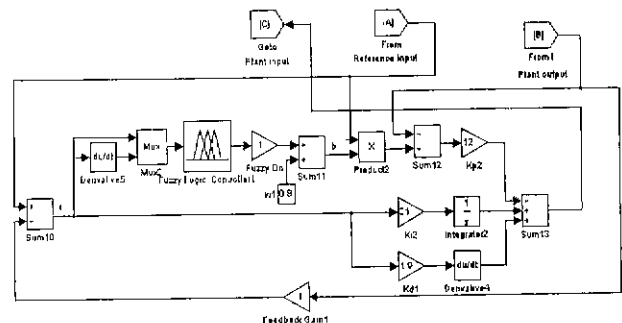


그림 3 하이브리드 제어를 위한 제어기 회로 구성도
Fig. 3 Hybrid controller circuit diagram

례 게인의 값을 보정하는데 사용된다.

3. 시뮬레이션 및 검토

지능제어 알고리즘에 의한 제어기 구현을 위해 MATLAB의 전력 시스템 블록(Power System Blockset)과 시뮬레이션 전용 라이브러리(Simulink library)를 조합하여 구성하였다. 시뮬레이션을 위한 전체 회로를 아래 그림 4와 같이 구성하였다.

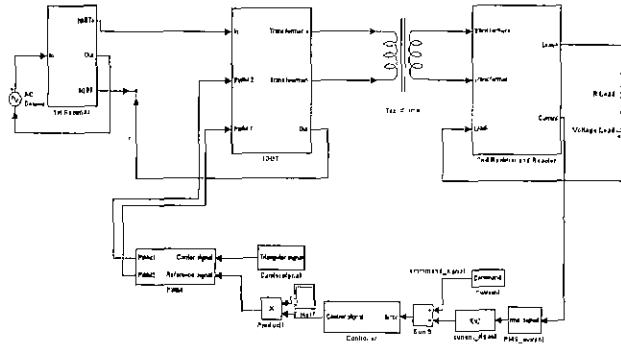


그림 4 시뮬레이션을 위한 회로 구성도
Fig. 4 The circuit diagram for simulation study

그림 3의 제어기에서 사용한 퍼지 추론 시스템(fuzzy inference system)의 입출력 소속 함수의 구조는 다음 그림 5와 같다.

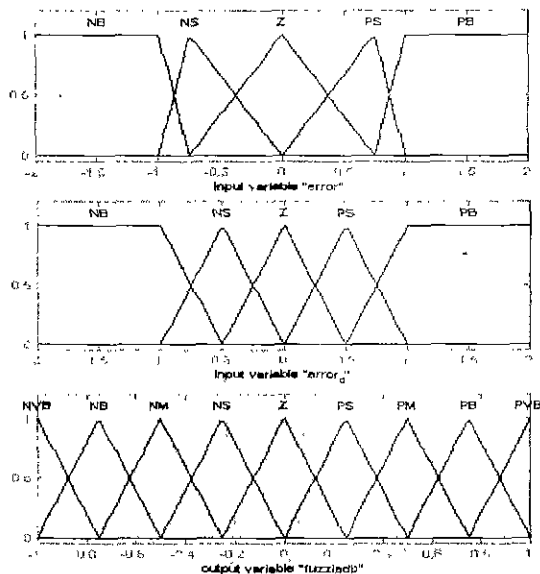
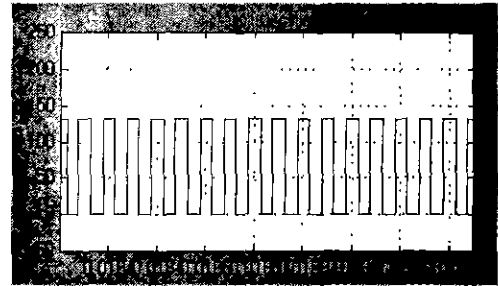


그림 5 퍼지 추론 시스템 입출력 소속 함수
Fig. 5 Input and output membership functions

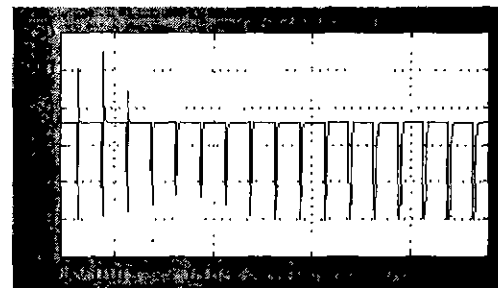
그림 4에서의 마지막 단 서브시스템(subsystem) 내에서 출력 전류(base current)의 변화가 측정된다. 이 전류의 피드백을 받아 제어기를 거쳐 원하는 전류로 제어하게 된다. 이상적인 경우에는 단순한 PWM 신호만으로 제어가 가능한 오프 라인 제어가 가능하다고 할 수 있지만 실제로는 펄스 전류에서의 고주파 성분¹⁷⁾으로 인해 전류 피드백시에

변동폭이 항상 일정치는 않게 된다. 따라서 이러한 특성과 기타 외란이나 노이즈의 영향을 고려한 피드백 제어기의 사용이 필요하다.

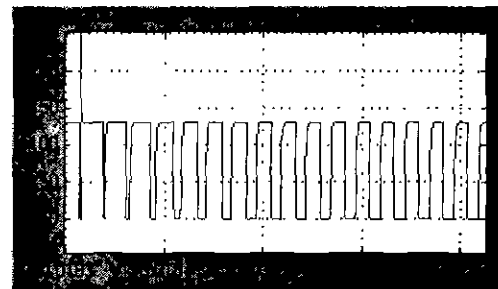
본 논문에서는 일반적인 PI 제어기를 사용하는 경우와 그림 3에서 제시한 하이브리드 제어기를 사용한 경우에 대한 시뮬레이션을 비교 수행하였다.



(a) 기준 용접 전류 파형



(b) PI 제어기에 의한 출력 전류 파형



(c) Hybrid 제어기에 의한 출력 전류 파형

그림 6 기준 용접 전류와 출력 전류 파형
Fig. 6 Reference welding current and Output current waveform

그림 6에서 원하는 (a)의 기준 전류 파형을 얻기 위해서 PWM 제어기를 통한 출력 전류 파형이 (b)와 (c)에 나타나 있다. 여기서 일반적인 PI 제어기만을 사용한 출력 전류 (b)보다는 퍼지 제어 시스템을 포함한 하이브리드 제어에 의한 출력 전류인 (c)의 특성이 양호함을 알 수 있다. (b)와 (c)에 보여지는 수렴 구간을 지나면 (a)와 같은 안정된 전

류 파형에 이르게 된다. 하이브리드 제어기에서는 퍼지 추론 시스템을 이용함으로써 오실레이션(oscillation)의 감소^[5]에 큰 효과를 볼 수 있었다. 하지만 오차(및 오차의 미분)의 크기가 커질수록 퍼지 소속 함수의 범위를 벗어나게 되어 퍼지의 영향력은 약해진다. 오차가 소속 함수의 정의된 범위 사이로 들어오기 시작하는 부분에서 퍼지 추론 시스템에 의한 그림 3의 b값의 변화가 생기고 이후 이 영향으로 비례 게인 항의 동적 변화가 생기면서 고정된 PID 제어기와 비교해 양호한 제어 특성을 보이게 된다. 제어기 입력 신호가 범위 내로 들어오기 전에서는 b값의 변화가 없는 상태라 할 수 있다. 이에 대응하기 위해 보다 적극적인 방법으로 본 논문에서는 그림 5에서와 같이 오차(및 오차의 미분) 신호에 대해서 그 값이 커지는 부분에서 보다 민감한 제어를 할 수 있도록 소속 함수(triangular MF)의 좌우 기울기를 키우는 방향으로 변경하였다. 초기에는 Ziegler-Nichols Method에 의한 PID 제어기의 각 게인을 구한 것으로 한 제어가 수행되고 퍼지 추론 시스템의 규칙에 의해 점차 비례 게인의 값이 계속 일정 범위 내에서 가감되도록 조정된다. 이러한 방식의 제어 알고리즘은 퍼지를 이용한 스케일 성분(scaling factor) b를 만들어가면서 전체적인 제어기 게인의 자동 튜닝을 하는 방식이다. 일반적인 기존의 PID 제어기의 경우 오버슈트(overshoot)와 정착시간(settling time) 사이에 trade-off가 존재하여 비례 게인 증가에 제약이 생기는데 이러한 제약을 약화시킬 수 있게 된다. 보다 향상된 초기 제어 특성을 보장하기 위해서는 제어기 게인의 초기값 설정에서도 유전자 알고리즘이나 신경망 알고리즘^[4]을 이용한 초기 게인의 자동 튜닝 방법을 적용할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 펄스 아아크 전류를 사용한 TIG 용접기가 기본적인 직류 아아크 방식을 사용하는 것에 비해 전력 소모 측면에서 우위에 있음을 수식을 통해 확인하였다. 또한 이러한 펄스 아아크 전류를 사용하는 TIG 용접기 시스템에 하이브리드 제어 방식을 사용하여 가장 일반적인 제어 방식에서의 단점을 보완하였다. 궁극적으로는 TIG 용접 시스템의 에너지 절감 및 제어 성능 향상을 통해 시스템의 전체적인 성능 향상을 도모하였다. 실제 구현에 있어서는 본 논문에서 제안한 방식에 추가로 직류고전압 아크 스타트방식의 채택 및 역률 개선 회로를 사용하게 되면 우수한 에너지 절감형 TIG 용접기 개발이 가능할 것이다. 이러한 지능형

제어 방식의 도입은 용접사 비숙련가의 원활한 작업 수행 능력을 보완하게 되며 보다 강인한 제어를 통해 외부 비선형적인 요소로 인한 시스템 손상에 보다 효율적인 대처가 가능하도록 할 것이다.

본 연구는 한국과학재단 '97 특정 기초 연구비(97-01-01-01-01-3) 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Luigi Malesani, Paolo Mattavelli, Leopoldo Rossetto, Paolo Tenti, Walter Marin, Alberto Pollmann, "Electronic Welder with High-Frequency Resonant Inverter", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 31, No. 2, pp. 273-279, 5, March/April, 1995.
- [2] X.M. Xeng, J. Lucas, Y.Y. Ren, A.B. Parker, "Welding with high-frequency square wave AC arcs", *IEE Proceedings*, Vol. 137, No. 4, pp. 193-198, July, 1990.
- [3] Jozsef Borka, Miklos Horvath, "A New, Simple, Low-Cost, Modular Arrangement of High Power Factor for both DC and AC Welding", *ISIE 99*, pp. 757-761, 1999.
- [4] Wen Li, Shanben Chen, "A Multivariable Fuzzy Self-Tuning PID Controller Using Neural Network", *IEEE The Fifth International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, pp. 699-703, December, 1998.
- [5] Zhen-Yu Zhao, Masayoshi Tomizuka, Satoru Isaka, "Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 23, No. 5, pp.1392-1398, September/October, 1993.
- [6] Antonio Visioli, "Fuzzy Logic Based Set-Point Weight Tuning of PID Controllers", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A. Systems and Humans*, Vol. 29, No. 6, pp. 587-592, November, 1999
- [7] Sergio Marques, Cicero Cruz, Fernando Antunes, Jesualdo Farias, "Step down converter with histeritic current control for welding application", *IECON*, pp. 676-681, 1997.