

전향보상기를 이용한 아크용접기용 3상 PWM 컨버터의 동특성 향상

具英謨, 崔海龍, 睦亨洙, 崔圭夏, 金奎植, 元忠淵

Dynamic Characteristics Improvement of Three-phase PWM Converter for Arc Welding Machine Using Feedforward Compensator

Young-Mo Gu, Hae-Ryong Choi, Hyung Soo Mok, Gyu-Ha Choe, Gyu-Sik Kim, Chung-Yun Won

요 약

일반적으로 아크용접기의 정류기로 다이오드정류기가 사용되고 있다. 이것의 문제점은 높은 고조파전류가 발생된다는 것이고 아울러 전원측의 오염문제를 야기한다. 본 논문에서는 3상 PWM 컨버터를 사용함으로써 아크용접기의 입력특성이 개선됨을 보인다. 회로구조상 다이오드 정류기와 PWM컨버터로 대체되고 부하단에 안정적인 전력을 공급하기 위하여 직류단전압이 PI제어기에 의해 제어된다. PI제어기가 직류단 전압제어를 위해 사용되는 경우 예측불가능한 용접부하의 특성상 높은 전압맥동성분이 발생된다. 따라서 본 논문에서는 전압제어기의 속응성을 개선하기 위하여 전향보상기가 도입되었고 이의 분석을 통하여 전압제어기의 외란으로 간주되는 부하전류의 변동이 전압의 맥동성분에 영향을 줄이는 이론적 예측을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증한다.

ABSTRACT

Generally diode rectifier has been used as preregulator of arc-welding machine. Its defect is the generation of high current harmonics which result in utility pollution. In this paper, using the three-phase PWM converter, the input performance of arc-welding machine is improved by increasing the input power factor. When the diode rectifier in the arc-welding machine is replaced with three-phase PWM converter, PWM converter should control DC voltage of the output side. If PI controller is used for the output DC voltage regulator, the output DC voltage has high ripple voltage due to the instantaneous load variation in the arc-welding machine. In this paper, the feedforward compensator has been introduced to reduce the DC voltage ripple. It lessens the influence of load current which is the disturbance of the output DC voltage regulator. Theoretical prediction of this analysis has been verified by comparing with experimental data

Key Words : PWM converter, Arc Welding Machine, Feedforward Compensator

1. 서 론

아크용접기는 전기적인 에너지를 열에너지 형태인 고온의 아크로 변환하여 모재를 용융, 접합하는 장치로서 산업현장에서 널리 사용되고 있다. 현재 사용하고 있는 아크용접기는 DC 전원공급 장치로서 다이오드 정류기를 사용해 왔다. 다이오드 정류기는 입력전

류에 저차 고조파를 다량으로 함유하여 용접기의 입력측 역률을 저하시키는 단점을 가지고 있다. 이러한 다이오드 정류기의 입력측 역률을 개선시키기 위해 일반적으로 PWM 컨버터를 고려해 볼 수 있다. 그런데, 아크용접기에 다이오드 정류기대신 3상 PWM 컨버터를 적용할 경우 PWM 컨버터는 다이오드 정류기에서 하지 않던 출력전압제어를 수행하여야 한다. 이때 교류

전동기 제어나 UPS에서 일반적인 이용되고 있는 PI제어기를 사용하여 PWM 컨버터의 출력전압을 제어할 경우 용접단 전력의 순시적인 변화로 인하여 DC link 전압에 리플이 생기는 문제가 발생하게 된다. 즉 부하 전력의 변화가 전압제어기의 외란으로 작용하여 전압제어기의 성능을 저하시키게 된다. 따라서 본 논문에서는 전향제어기법을 사용하여 용접전력이 순시적으로 변함으로서 생기는 출력 전압의 리플을 최소화하였다. 시뮬레이션 및 실험을 통하여 다이오드정류기와 PWM 컨버터의 입력역률 및 출력전압의 리플을 비교함으로써 성능향상효과를 보이고, 전향보상기의 사용으로 인한 출력측 전압제어성능의 향상을 검증하였다.

2. CO₂ 아크용접기의 부하특성

2.1 시스템 구성

그림 1은 아크 용접기의 DC 전원부로 사용될 전압형 3상 PWM 컨버터의 구성도이다. 3상 전원과 입력측 리액터, 전력변환을 위한 6개의 스위치모듈, 출력측 캐패시터로 구성되어 있다.

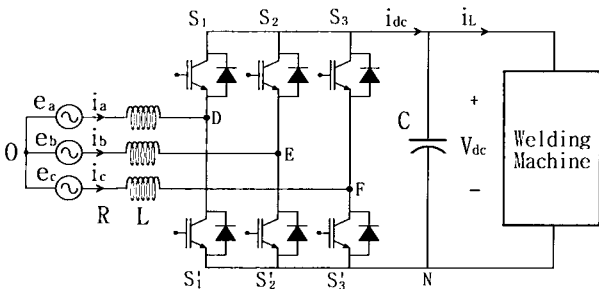


그림 1 3상 PWM 컨버터의 구성도
Fig. 1 Configuration of three phase PWM converter

PWM 컨버터를 용접기에 적용할 때 용접전력의 변화는 PWM 컨버터 제어기의 외란으로 작용하게 되므로 용접전력의 변화에 대해 인지할 필요가 있다. 용접단의 전압·전류변화 및 용접전력의 변화를 나타내면 그림 2와 같다. 단락구간과 아크구간이 반복되면서 전력은 급격히 변화한다. 용접기 순시전력은 용접기의 종류에 따라 틀리지만 아크용접기의 단락이행모드 중의 150[A]영역에서는 용접주기가 약 80[Hz]정도이고 최대전력은 약 5.5[kW]이며 평균전력은 약 2.6[kW]이다 [1][2]

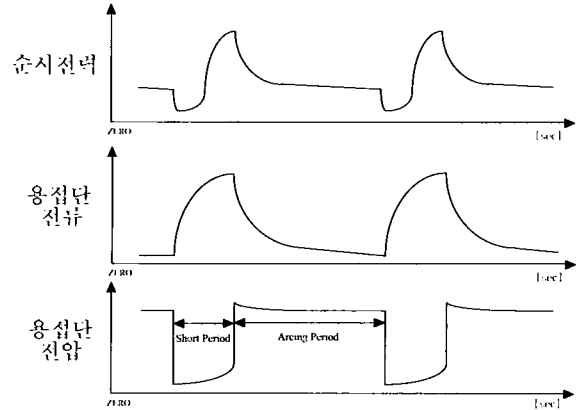


그림 2 용접단의 순시전력, 전압, 전류의 변화
Fig. 2 Instantaneous power, voltage and current (load side)

이러한 아크용접기에 식 (1),(2)와 같은 일반적으로 사용되고 있는 동기좌표계 PI전류제어기와 식 (3)과 같은 PI전압제어기를 사용할 경우에는 그림 4와 같이 DC link 전압에 다이오드 정류기를 사용하였을 경우보다 더 큰 전압리플이 나타나게 된다 [3][4].

$$V_q^* = - \left[k_{piq}(i_q^{e*} - i_q) + k_{iiq} \int (i_q^{e*} - i_q) dt \right] - \omega L i_d^e + E \quad (1)$$

$$V_d^* = - \left[k_{pid}(i_d^e - i_d) + k_{iid} \int (i_d^e - i_d) dt \right] + \omega L i_q^e \quad (2)$$

$$i_q^{e*} = k_{pv}(V_{dc}^* - V_{dc}) + k_{iv} \int (V_{dc}^* - V_{dc}) dt \quad (3)$$

여기서

- $k_{piq}, k_{iiq}, k_{pid}, k_{iid}$: q, d축 전류제어기 P, I gain
- k_{pv}, k_{iv} : 전압제어기 P, I gain

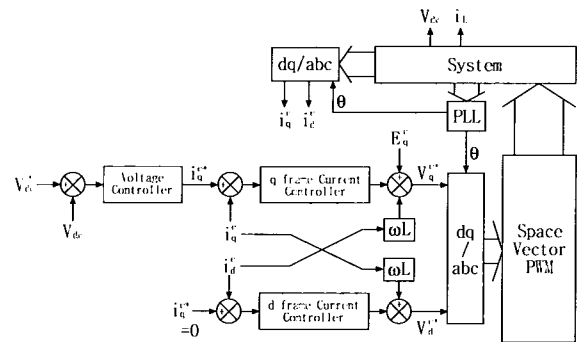
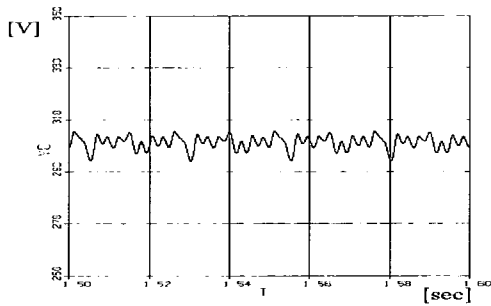
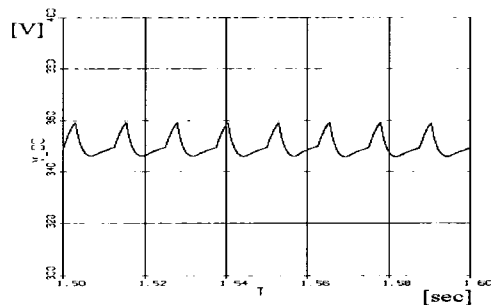


그림 3 전체 제어시스템의 블록선도
Fig. 3 Overall block diagram of control system

그림 4.(a)는 다이오드 정류기를 사용했을 때의 용접기의 부하전력에 대한 시뮬레이션 파형이고, 그림 4.(b)는 일반적인 PI 제어기를 사용하였을 경우의 파형이다. 다이오드 정류기에서는 약 $\pm 5[V]$, PWM 컨버터의 경우에는 약 $\pm 20[V]$ 의 전압리플을 보이고 있다. 이는 다이오드 정류기의 리플보다 더 큰 전압 리플을 보이고 있다. 따라서 입력역률을 향상시키기 위해 적용된 PWM 컨버터에 일반적으로 사용하는 PI 전압제어기를 사용하게 되면 출력전압은 다이오드 정류기를 사용하였을 때 보다 그 성능이 저하되게 된다.



(a) 다이오드 정류기



(b) PWM 컨버터

그림 4 DC link 전압
Fig. 4 DC link voltage

3. 전향보상기의 설계 및 시스템 해석

앞에서 살펴본 것과 같이 용접전력의 시간에 따른 급격한 변화는 PWM 컨버터의 제어루프에서 외란으로 작용하여 제어기의 성능을 저하시키게 된다. 따라서 용접전력의 급격한 변화에도 출력측 전압의 안정적인 제어를 하기 위한 대책이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 용접전력의 변동이 컨버터의 제어기의 성능을 저해하지 않도록 컨버터의 전압제어

기를 개선하는 방법으로 전향보상기를 사용하였다. 일반적인 전향보상기의 사용 목적은 컨버터 입력 기준신호의 큰 스텝 변화에 의해 생기는 정상상태 출력 에러를 보상하기 위함이다. 이는 정상상태 및 동특성을 향상시키고 컨버터 출력에 나타나는 외란의 효과를 줄이는 작용을 한다. 이러한 전향보상기는 시스템 안정도에는 영향을 미치지 않으며, 구성이 용이하다는 장점을 가지고 있다¹⁵⁾.

전향보상루프는 전압제어기 출력에 삽입하여 구성한다. 이는 전압제어를 위해 DC단으로 흘러야 할 전류와 부하측으로 흘러야 할 전류를 계산하여 입력측에 흐르도록 함으로서 부하변동에 대한 영향을 최소화하여 과도응답 및 정상상태응답을 향상시키는 효과를 보게된다. 전향보상기를 포함한 전압제어기는 식 (4)와 같으며, 제어블록선도는 그림 5와 같다. 여기서 K_F 는 전향보상기득이며 부하전류에 대한 출력전압의 주차수 응답특성을 통하여 최적의 값을 선정한다.

$$i_q^{e*} = [k_p(V_{dc}^* - V_{dc}) + k_i \int (V_{dc}^* - V_{dc})dt] + K_F i_L \quad (4)$$

여기서 K_F : 전향보상기 이득

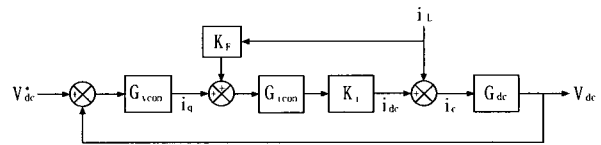


그림 5 전향보상기를 포함한 시스템 제어블록도
Fig. 5 Control block diagram including feedforward compensator

전향보상기를 적용할 경우 PWM 컨버터의 제어기 동특성에 어떠한 영향을 미치는가를 해석하기 위해 컨버터의 상태변수, 제어변수, 입력변수, 부하 외란 사이의 다양한 전달함수를 제공해 주는 소신호 모델을 이용하였다¹⁶⁾.

3상 PWM 컨버터의 소신호 모델을 이용하여 다음과 같이 DC단 전압변동분은 출력측 직류 기준전압의 변동분과 입력전압의 변동분, 부하전류의 변동분에 대한 전달함수 형식으로 나타낼 수 있다.

$$\widehat{V}_{dc} = T_{ref} \widehat{V}_{ref} + T_E \widehat{E}_q^c + T_L \widehat{i}_L \quad (5.a)$$

$$T_{ref} = \frac{\widehat{V}_{dc}}{\widehat{V}_{ref}} = \frac{G_{dc} G_{conv} K_{si}}{\Delta} \quad (5.b)$$

$$T_E = \frac{\widehat{V}_{dc}}{\widehat{E}_q^c} = \frac{G_{dc} (K_{sv} - K_{fv} K_{si})}{\Delta} \quad (5.c)$$

$$T_L = \frac{\widehat{V}_{dc}}{\widehat{i}_L} = \frac{G_{dc} (K_{fi} K_{si} - 1)}{\Delta} \quad (5.d)$$

$$\Delta = 1 + G_{dc} (G_{conv} K_{si} + K_{dc}) \quad (5.e)$$

여기서, $K_{fv} = -\frac{\overline{i_{FC}}}{E_q^c}$, $K_{fi} = K_F \frac{\overline{V_{dc}}}{E_q^c}$, $G_{dc} = \frac{1}{CS}$,

$$G_{conv} = K_{pr} + \frac{K_{iv}}{S}, K_{si} = \frac{3K_{ci} \overline{E}_q^c}{2 \overline{V}_{dc}}, K_{dc} = -\frac{\overline{i}_{dc}}{\overline{V}_{dc}}$$

전압제어루프를 삽입한 후의 전달함수를 살펴보면 시스템 전압제어루프의 전달함수는 변하지 않고, 부하 전류 변동분과 입력전압 변동분에 대한 전원전압의 전달함수만 변화하였다. 따라서 전원전압이 3상평형으로 크기와 위상이 변동되지 않으면 부하전류 전향보상루프는 부하전류의 변동만이 출력 직류전압의 변동분에 영향을 주게된다. 따라서 전향보상루프의 추가로 전압 제어의 성능과 무관하게 출력 직류전압의 부하전류에 대한 영향을 최소화 할 수 있다.

그림 6은 T_L 의 전향보상 전후의 주파수 응답이다. 전압제어기의 자연주파수인 30[Hz] 근처에서 이득이 가장 큰 값을 나타내고 있다. 앞에서 언급한바와 같이 용접전력이 약 80[Hz]의 주기를 가지고 변하므로 전향보상기를 적용하지 않을 경우에는 출력전압의 리플을 발생시키게 된다. 전향보상기를 추가하였을 때의 주파수 응답을 살펴보면, 이득은 용접전력 주기인 80[Hz]에서 전향보상기를 추가하기 전보다 약 44dB이 줄어들었다. 즉, 전향보상루프를 첨가함으로써 부하전류에 대한 출력 직류전압의 영향이 줄어들게 됨을 알 수 있다.

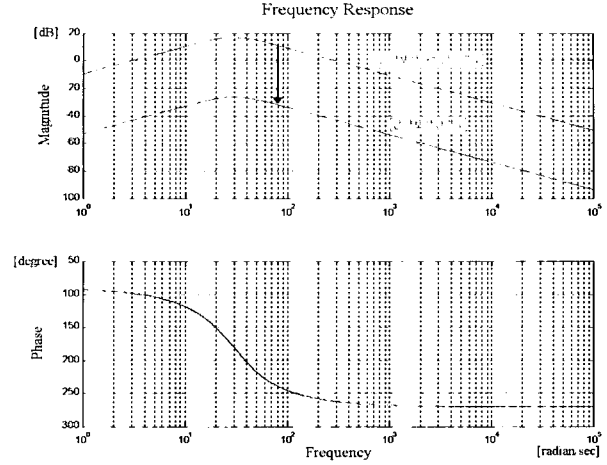


그림 6 전향보상기에 따른 전압제어기의 주파수 응답
Fig. 6 Frequency response of voltage controller as to feedforward compensator

4. 시뮬레이션 및 실험

4.1 시뮬레이션 및 실험 조건

앞장의 해석을 검증하기 위해 본 장에서는 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 시뮬레이션은 ACSL (Advanced Continuous Simulation Language)을 이용하여 수행하였으며, ACSL에서 수행한 시뮬레이션의 자료 및 실험 자료의 처리는 MATLAB을 이용하였다. 시스템 구성 및 시스템 파라미터는 그림 7 및 표 1과 같다.

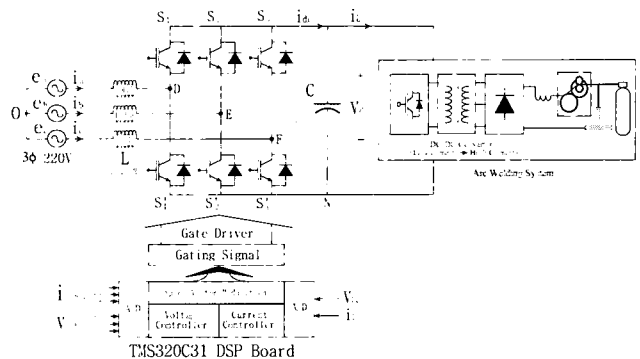


그림 7 3상 PWM 컨버터의 구성도
Fig. 7 Configuration of three phase PWM converter

표 1 시뮬레이션 조건

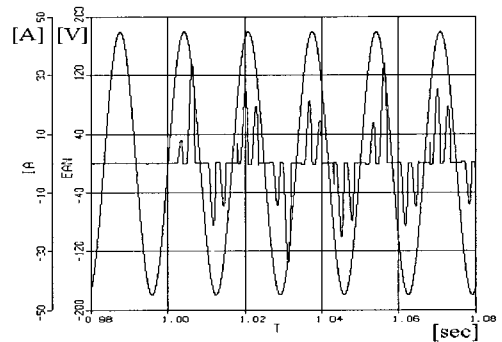
전원전압	220[V]
전원측 인덕턴스	3.1[mH]
직류측 캐패시터	3300[μ F]
직류전압	350[V]
샘플링 주파수	8[kHz]
스위칭 주파수	4[kHz]
전류제어기 상수 (ζ_i, ω_i)	0.707, 600
전압제어기 상수 (ζ_v, ω_v)	0.707, 30

4.2 시뮬레이션 및 실험 결과

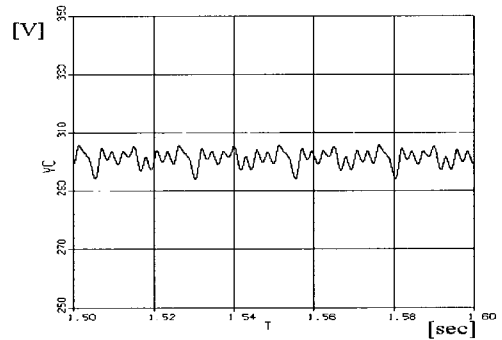
그림 8은 용접기의 DC 전원장치로 다이오드 정류기를 사용했을 때의 입력전압·전류 및 DC단 전압의 변화를 나타낸다. 그림에서와 같이 입력측 전류의 파형이 고조파가 다량 함유되어 입력역률이 낮음을 알 수 있다. 그림 9,10은 용접기의 DC 전원장치로 PWM 컨버터를 사용했을 때의 입력전압·전류 및 DC단 전압의 변화를 나타낸다. 입력측 전류의 파형을 보면 입력전압과 동상인 정현파 형태의 전류를 나타내고 있다. 따라서 기존 용접기의 단점인 입력역률의 개선 효과를 볼 수 있다. 그림 10.(b)는 전향보상기를 포함하였을 경우의 DC link 전압파형으로 전향보상기의 영향으로 출력측 전압의 리플이 감소됨을 알 수 있다.

그림 11은 용접기의 DC 전원장치로 다이오드 정류기를 사용했을 때의 입력전압·전류 및 DC단 전압의 변화를 나타낸다. 시뮬레이션과 같이 입력측 전류의 파형이 고조파가 다량 함유되어 입력역률이 낮음을 알 수 있다. 그림 12,13은 용접기의 DC 전원장치로 PWM 컨버터를 사용했을 때의 입력전압·전류 및 DC단 전압의 변화를 나타낸다. 입력측 전류의 파형을 보면 입력전압과 동상인 정현파 형태의 전류를 나타내고 있다. 따라서 기존 용접기의 단점인 입력역률의 개선 효과를 볼 수 있다. 전향보상기의 영향으로 출력측 전압의 리플이 감소됨을 확인하기 위해 출력측 직류전압의 파형을 차단주파수 500[Hz]의 저역통과필터로 필터링하여 그림 14에 나타내었다. 용접단 부하전력의 변동 주파수가 저주파수 영역이므로 필터링하여 본 전원전압의 변동은 실질적인 부하전력변동에 대한 전원전압의 변동분이라 할 수 있다. 전향보상기를 추가한 결과 전원전압의 리플이 줄었음을 알 수 있다. 그림 15는 용접기의 전원으로 다이오드 정류기와 PWM 컨버터를

사용했을 때 그 성능을 비교하여 나타내었다. 여기서 전압리플은 리플전압의 최대값과 최소값과의 차를 DC link 전압의 평균값으로 나눈 백분율로 표시하였다. 이는 다이오드 정류기의 DC link 전압과 3상 PWM 컨버터의 DC link 전압은 평균값이 다르므로 절대량으로 비교할 수 없으므로 백분율로 비교하였다.

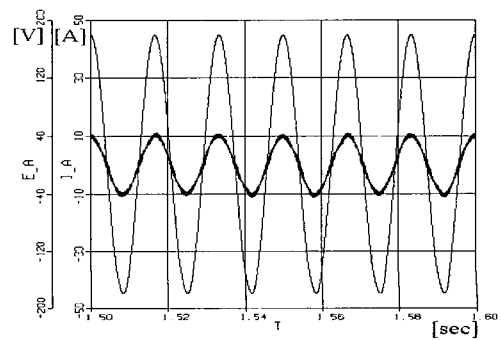


(a) 입력측 전압·전류

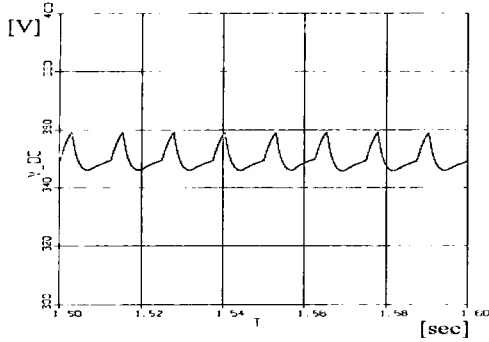


(b) DC link 전압

그림 8 기존용접기의 입력파형 및 DC-link 전압
Fig. 8 Input waveforms and DC-link voltage of conventional arc welding machine



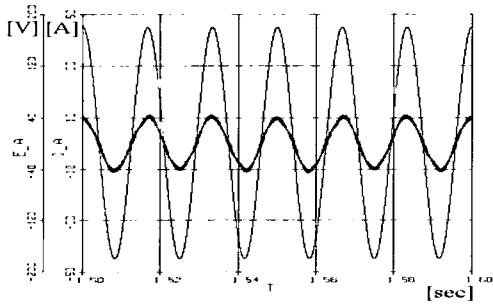
(a) 입력측 전압·전류



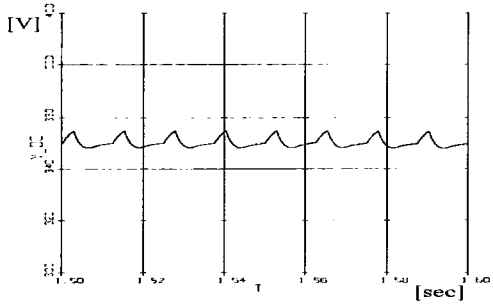
(b) DC link 전압

그림 9 전향보상기 없는 PWM형 용접기의 입력파형 및 DC-link 전압

Fig. 9 Input waveforms and DC-link voltage of PWM type arc welding machine without feedforward compensator



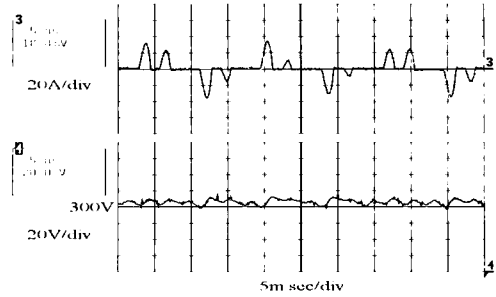
(a) 입력측 전압·전류



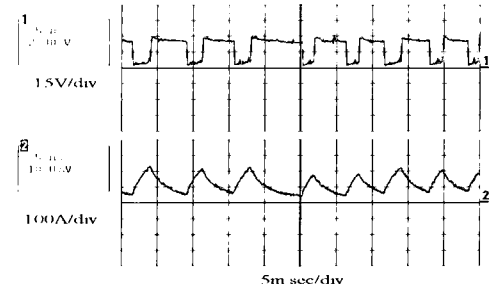
(b) DC link 전압

그림 10 전향보상기 사용 PWM형 용접기의 입력파형 및 DC-link 전압

Fig. 10 Input waveforms and DC-link voltage of PWM type arc welding machine with feedforward compensator



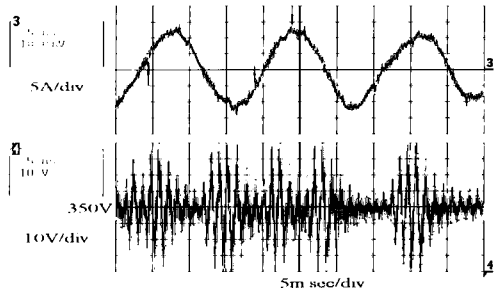
(a) 입력측 전류와 DC link 전압



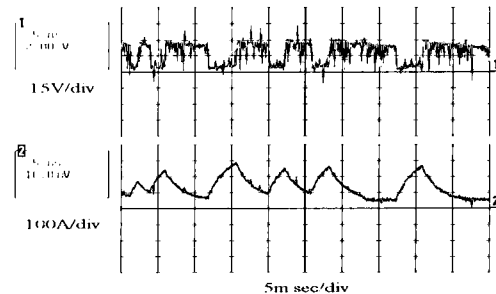
(b) 용접단 전압·전류

그림 11 기존용접기의 입출력특성

Fig. 11 Input/output characteristics of conventional arc welding machine



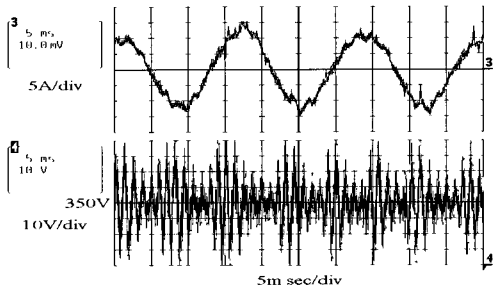
(a) 입력측 전류와 DC link 전압



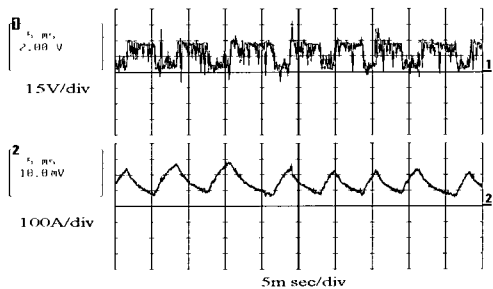
(b) 용접단 전압·전류

그림 12 전향보상기 없는 PWM형 용접기의 입력파형 및 DC-link 전압

Fig. 12 Input waveforms and DC-link voltage of PWM type arc welding machine without feedforward compensator



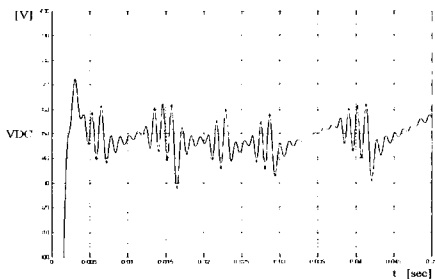
(a) 입력측 전류와 DC link 전압



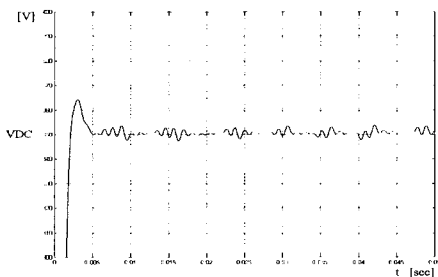
(b) 용접단 전압·전류

그림 13 전향보상기를 갖는 PWM형 용접기의 입력파형 및 DC-link 전압

Fig. 13 Input waveforms and DC-link voltage of PWM type arc welding machine with feedforward compensator

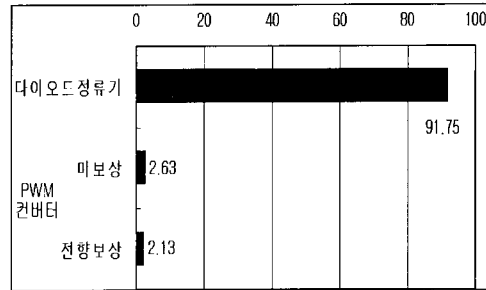


(a) 전향보상 전

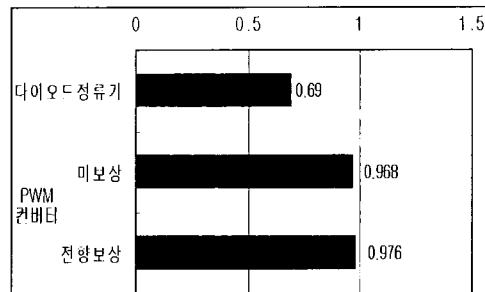


(b) 전향보상 후

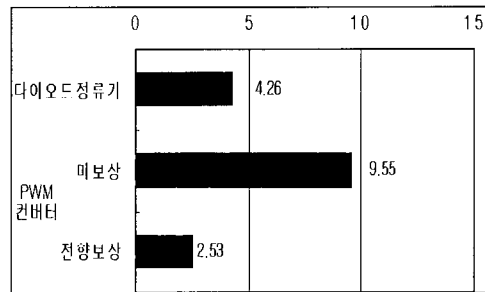
그림 14 저역통과필터링 후의 DC-link 전압(cutoff=500Hz)
Fig. 14 DC-link voltage after lowpass filtering (cutoff=500Hz)



(a) 입력 전류의 THD [%]



(b) 입력역률



(c) DC link 전압리플 [%]

그림 15 기존용접기와 PWM형 아크용접기의 비교
Fig. 15 Comparison of conventional and PWM type arc welding machine

5. 결론

본 연구에서는 기존의 아크용접시스템의 DC 전원장치로 사용하던 다이오드 정류기 대신 3상 PWM 컨버터를 적용함으로써 입력역률을 개선시키고 PWM 컨버터의 적용으로 인하여 발생하는 용접전력 변동에 의한 출력전압의 리플을 전향보상기를 이용하여 최소화시켰으며 시뮬레이션 및 실험으로 이를 검증하였다.

본 연구는 1999년도 한국과학재단 특정기초지원연구비에 의하여 이루어 졌음. (No. 97-01-01-01-01-3)

참 고 문 헌

- [1] P. Kazmierkowski and Luigi Malesani, "Current Control Technique for Three Phase Voltage Sour PWM Converter : A Servey", IEEE Trans. Indus. Elec., Vol. 45, No. 5, pp. 691-703, 1998.
- [2] T.G. Habetler, "A Space Vector Based Rectifier Regulator for AC/DC/AC Converters", IEEE Trans. Power Elec., Vol. 8, No. 1, pp. 30 36, 1993.
- [3] 채영민, "순시전류 제어형 인버터 아크 용접기의 용접성능향상 및 역률개선에 관한 연구", 건국대학교대학원 박사 학위 논문, 1999.
- [4] 안영호, 이종봉, 엄동석 "GMA용접의 용적이행현상에 미치는 제인자의 영향", 대한용접학회지, 16권, 1호, 1998.
- [5] M. T. Tsai and W. I. Tsai, "Analysis and Design of Three-Phase AC to DC Converters with High Power Factor and Near-Optimum Feedforward", IEEE Trans. Indus Elec., Vol. 46, No. 3, pp. 535 543, 1999.
- [6] R. Wu, S. B. Dewan and G. R. Slemon, "Analysis of an AC to DC Voltage Source Converter Using PWM with Phase and Amplitude Control", IEEE Trans. Indus Appl., Vol. 27, No. 2, pp. 355 364, 1991.

저 자 소개



구영모(具營謨)

1974년 10월 17일생. 1998년 건국대 공대 전기공학과 졸업(학사). 2000년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 단암 정보통신 연구원.



최해룡(崔海龍)

1973년 4월 20일생. 1996년 건국대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년~현재 동 대학원 전기공학과 박사 과정.



목형수(睦亨洙)

1963년 10월 31일생. 1986년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 졸업(석사). 1992년 동 대학원 졸업(공학박). 1992년~1996년 서울산업대 공대 제어계측공학과 조교수. 현재 건국대 공대 전기공학과 교수.



최규하(崔圭夏)

1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 졸업(공학박). 1987년~1988년 미국 오레곤주립대 객원교수. 1997년~1998년 건국대학교 연구처장 역임. 현재 건국대 공대 전기공학과 교수 및 전력전자기술연구소장. 당 학회 총무이사.

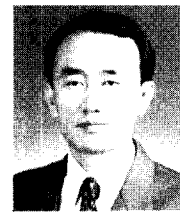
총무이사.



김규식(金奎植)

1958년 8월 25일생. 1981년 서울대 공대 전자공학과 졸업. 1983년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(박사). 1988년~1992년 대우중공업 중앙연구소 선임연구원. 1993년~현재 서울서립대학교 전기전자공학부 조교수. 당 학회 편집위원.

공학부 조교수. 당 학회 편집위원.



원충연(元忠淵)

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대공대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1997년 12월~1992년 12월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 방문교수. 1988년 3월~현재 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터 공학부 교수. 당 학회 학술이사 및 전력변환연구회 위원장.

3월~현재 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터 공학부 교수. 당 학회 학술이사 및 전력변환연구회 위원장.