

액티브 스너버를 이용한 고주파 용접기 컨버터 개발

신준영¹, 이재민¹, 최승원², 이준영[†]

Development of Converter for High Frequency Welding Machines using Active Snubber

Jun-Young Shin¹, Jae-Min Lee¹, Seung-Won Choi², and Jun-Young Lee[†]

Abstract

Welding machines are high-capacity systems used in a low-frequency range using IGBT. As their system is similar to a large transformer, most welding machines suffer a great loss because of hard switching and vast leakage inductance. A voltage-balancing circuit is designed to overcome these shortcomings. This circuit can reduce the transformer size by making it into a high frequency and reducing the input voltage by half and by adopting a serial structure that connects two full-bridges in a series to use a MOSFET with a good property at high frequency. In addition, a Schottky diode is used in the primary rectifier to overcome the low efficiency of most welding machines. To use the Schottky diode with a reliably relatively low withstanding voltage, an active snubber is adopted to effectively limit the ringing voltage of the diode cut-off voltage.

Key words: Active snubber, Cell-balancing circuit, High frequency inverter, Soft swiching pwm, Schottky diode, Series structure full-bridge converter, Zero voltage switching

1. 서 론

인버터 용접기는 기존의 사이리스터 용접기와는 달리 단순히 교류를 직류로 변화하지 않고 1차 정류한 직류를 스위칭 소자를 이용하여 다시 고주파의 교류로 변환한 이후 다시 직류로 변환하여 높은 주파수에 따른 변압기 등의 크기를 줄여 기존의 용접기보다도 매우 작고 가볍게 만들어지고 있다. 이러한 인버터 용접기는 단순히 전류를 직류로 변환하는데 그치지 않고 정밀한 용접 제어를 위하여 DSP를 내장하고 있다. 디지털화된 인버터 용접기는 용접을 위한 전용 소프트웨어를 탑재하고

용접 시 전류 및 전압 등을 실시간으로 피드백 받아 용접조건 및 현상의 변화를 DSP로 처리하여 높은 용접 재현성과 용접품질을 기대할 수 있게 되었다^[1].

용접기는 3상 교류 입력을 받아 정류기를 거쳐 DC/DC 컨버터를 통하여 저전압, 대전류의 출력을 이용하여 금속 재료를 용접한다. 기존의 용접기는 대용량 시스템으로 IGBT를 이용하여 주파수가 낮은 범위에서 사용되므로 변압기 등 시스템 크기가 매우 크다. 본 논문에서는 고주파화를 통하여 용접기의 크기를 줄이는 것이 목적으로 용접기의 구성 중 브리지 다이오드로 구성된 간단한 구조인 입력 AC/DC부를 제외한 인버터, 변압기, 정류기, 출력 인덕터를 포함하는 DC/DC 컨버터를 설계하고 실험 검증하였다.

일반적인 아크 용접기용 전원은 저전압, 대전류 출력(출력 전압 20~80[V], 출력 전류 200~2000[A]정도)이 필요하게 된다. 산업용으로 가장 생산 수량이 많은 10~30[kW]정도의 용접 전원으로는 용량·비용 면에서 MOSFET의 사용이 어려워 IGBT를 이용한 10~20[kHz]정도의 하드 스위칭 인버터 방식이 일반적이다^[2]. 하지만 용접 전원의 소형·경량화를 위해 스위칭 주파

Paper number: TKPE-2016-21-4-10

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: pdpljy@mju.ac.kr,

Dept. of Electrical Engineering, Myongji University

Tel: +82-31-330-6357 Fax: +82-31-330-6977

¹ Hyundai Welding Corporation

² Dept. of Electrical Engineering, Myongji University

Manuscript received Aug. 24, 2015; revised Sep. 13, 2015;

accepted July 11, 2016

— 본 논문은 2015년 전력전자학술대회 우수추천논문임

— 본 논문은 편집위원회에서 우수기술논문으로 추천됨

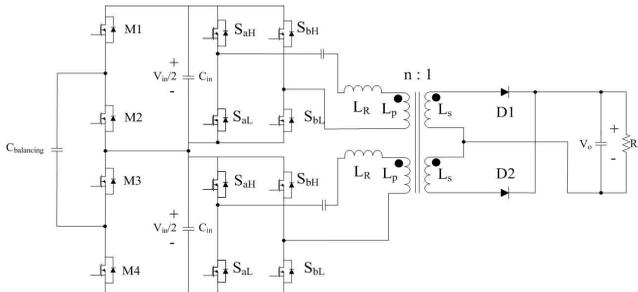


Fig. 1. Cell-balancing circuit and full-bridge circuit.

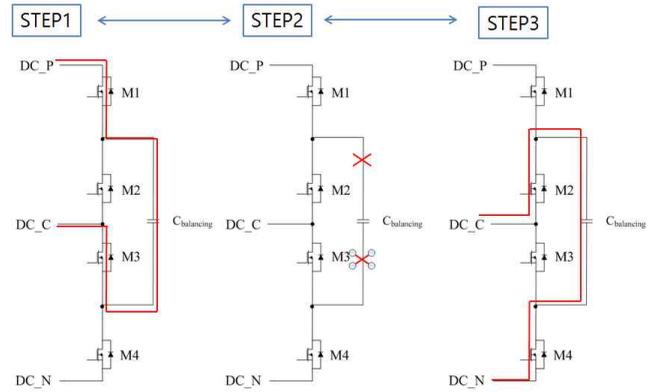
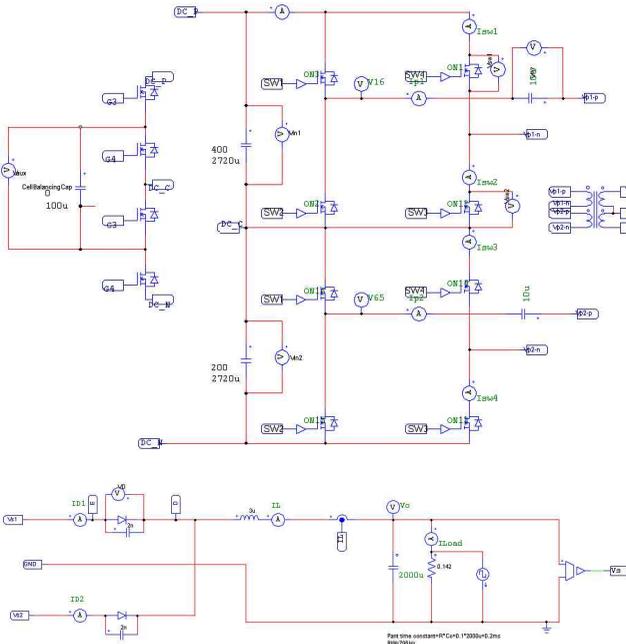


Fig. 3. Operation of cell-balancing circuit.



(a) Circuit diagram for simulation

(b) Simulation result of Proposed converter

Fig. 2. Simulation for proposed DC-DC converter.

수를 높여 변압기 및 출력 인덕터의 크기를 줄이고 효율 향상을 위한 소프트 스위칭 기법 사용 및 2차 정류기에 쇼트키 다이오드를 사용하기 위해 다이오드 차단 전압의 Ringing 전압을 제한해 줄 수 있는 액티브 스너버를 사용하는 것이 본 연구의 목적이다.

기존의 RCD 스너버를 이용하여 다이오드 차단전압의 Ringing 전압을 제한하기 위해서는 스너버의 저항 R이 매우 커야하며 스너버에서 발생하는 전력을 전부 열에너지로 소비한다는 단점이 있었다. 액티브 스너버는 MOSFET을 이용하기 때문에 저항보다 크기 및 무게 면에서 유리하며 Flyback Converter 구조를 취하여 스너버의 출력 전력을 입력으로 회생하여 효율 향상을 기대할 수 있다.

2. 제안된 직렬구조 Full-Bridge Converter

입력 전압 DC 600V를 MOSFET을 사용하기 위해 그림 1의 회로도 와 같이 2개의 Full-Bridge를 직렬로 만들어 각각 하나의 Full-Bridge에는 300V의 전압이 인가된다. 이때 2개의 300V 전원의 부하 전력 소비가 동일하지 않기 때문에 전압 불균형 상태가 되는 것을 방지하기 위하여 4개의 MOSFET을 이용한 전압균형회로를 사용한다. 전압균형회로는 20kHz의 스위칭 주파수를 가지며 불균형 상태의 전압을 상쇄하도록 상위 300V Full-Bridge와 하위 300V Full-Bridge를 전압균형회로에 있는 Cell Balancing Capacitor에 의해 에너지를 상호 교환하여 전압 균형 상태를 유지해 준다. 이러한 회로를 채택하여 높은 입력 전압을 사용하여도 2개의 Full-Bridge로 전압을 분배하므로 IGBT에 비해서 내전압은 낮지만 스위칭 주파수가 더 높은 MOSFET을 사용할 수 있다는 장점이 있으며 전하의 이동만을 담당하므로 작은 MOSFET으로 회로 구현이 가능하고 Open loop 제어방식으로 제어가 간단하며 비교적 낮은 주파수의 고정 시비율 동작으로 손실이 작다.

전압균형회로의 기본 동작은 그림 3과 같이 DC Link의 (+)인 DC_P와 M1, Cell-Balancing 캐패시터를 지나 2개의 직렬구조 Full-Bridge의 연결점인 DC_C와 연결된 M3를 통하여 High Side Full-Bridge의 전압을 감시

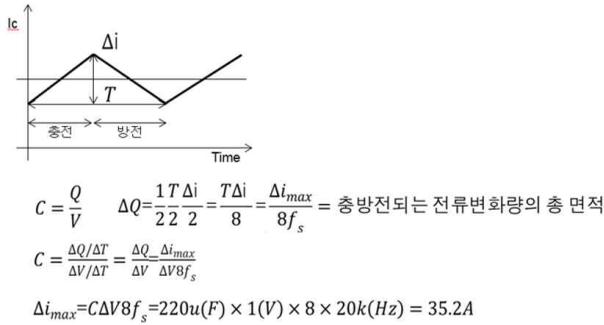


Fig. 4. Interaction formula of cell-balancing circuit.

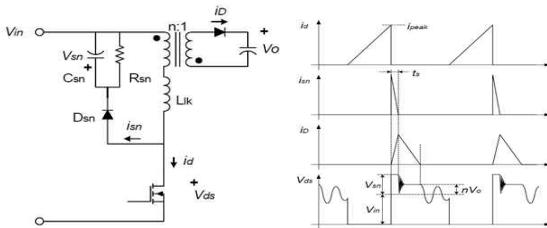


Fig. 5. Flyback DCM active snubber circuit.

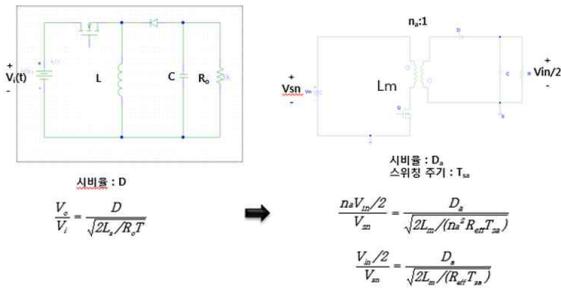
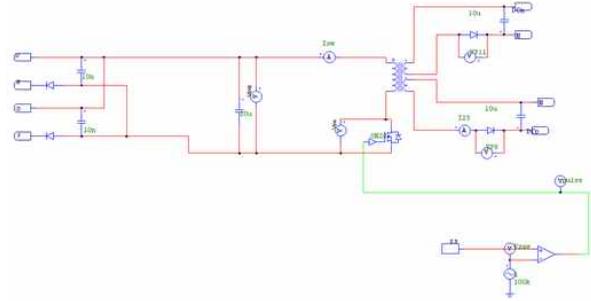


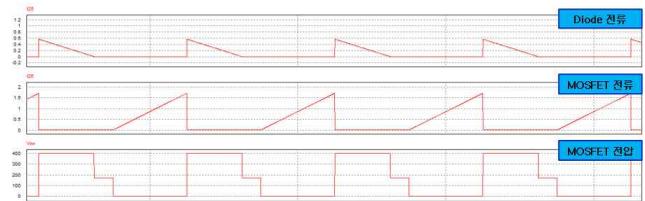
Fig. 6. Interaction formula of active snubber.

하고 Dead Time 다음 주기에는 DC_C와 M2, Cell-Balancing 캐패시터를 지나 DC Link의 (-)인 DC_N과 연결된 M4를 통하여 Low Side Full-Bridge의 전압을 감시한다.

전압균형회로의 캐패시터에 충전되는 전류의 함수를 일반적인 삼각파 함수라고 가정하면 한 주기 T동안 충전과 방전을 통한 전류의 변화량은 충전되는 전류 변화량의 총 면적과 같고 그림 4와 같은 관계식을 나타낸다. 220uF의 용량을 가지는 캐패시터와 20kHz의 스위칭 주파수를 이용하여 한 주기에 조절 가능한 전압을 1V라고 한다면 충전되는 전류량은 약 35.2A가 된다. 하지만 실질적으로 사용된 전해 캐패시터의 충전 전류 스펙은 2A정도이므로 실제 충전으로 조정되는 전압은 약 0.058V 정도로 미세하지만 Cell-Balancing 동작은 빠른 속도로 스위칭하기 때문에 매 주기마다 미세한 전압조정으로도 1초에 상당한 충전 동작이 이루어짐



(a) Circuit diagram for simulation



(b) Simulation result of Proposed converter

Fig. 7. Simulation for active snubber.

을 알 수 있다.

기존 용접기의 하드스위칭으로 인한 스위칭 손실을 줄이기 위해 소프트 스위칭 기법을 사용하였다. ZVS는 Freewheeling이 끝나는 시점에 도통되는 스위치가 누설 인덕턴스의 에너지로 영전압 스위칭을 하므로 큰 누설 인덕턴스가 필요하다. 누설 인덕턴스를 키우면 ZVS는 용이하나 유효소비율의 감소로 변압기 권선비가 낮아져야 하므로 스위치의 전류 스트레스가 증가하기 때문에 이러한 부분들을 고려하여 최적의 값을 도출하는 것이 필요하다. 하지만 큰 누설 인덕턴스는 2차 정류기의 Ringing 증가로 인한 쇼트키 다이오드 사용에 제한이 생길 수 있어 누설 인덕턴스는 최대한 작게 하고 1차 측에 인덕터를 추가하여 ZVS가 용이하도록 설계하였다.

변압기와 2차 정류기 부분은 Center Tap 구조를 채택하였고 효율 향상을 위해 쇼트키 다이오드를 사용하였다. 쇼트키 다이오드는 일반 다이오드보다 역전압 내압이 낮기 때문에 다이오드 차단전압의 Ringing 전압을 제한하기 위하여 변압기의 누설인덕턴스를 최대한 작게 설계하고 액티브 스너버를 이용하였다.

기본적으로 스너버는 다이오드에 역방향 전압이 걸릴 때 발생하는 Ringing 에너지를 스너버 캐패시터로 저장하고 순방향 전압일 때 저장된 에너지를 저항에서 열로 소비하기 때문에 스너버 저항이 커야한다는 단점이 있어 액티브 스너버를 이용하여 효과적으로 Ringing 전압을 제한하며 발생된 에너지를 입력측으로 회생하는 구조를 채택하였다.

액티브 스너버는 2차 측 정류 다이오드의 역전압의

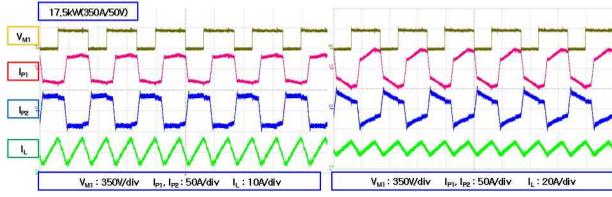


Fig. 8. Experimental results of proposed DC-DC converter.

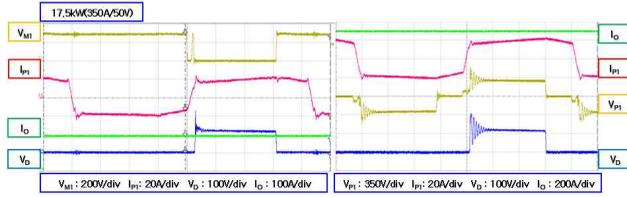


Fig. 9. Experimental results according to the kind of snubber.

링잉전압이 입력전압이 되고 설계된 컨버터를 통하여 생성된 출력을 전체 Full-Bridge의 입력전압으로 회생시킨다. 플라이백 컨버터를 기반으로 회로 설계를 하였고 회로와 파형은 그림 5에 나타내었다. 플라이백 컨버터는 벅부스트 컨버터를 기반으로 하기 때문에 액티브 스너버를 설계하기 위하여 그림 6과 같이 등가회로를 구성하고 관계식을 유도하였다. 플라이백 컨버터의 출력을 $V_{in}/2$ 로 나타낸 것은 실제 회로는 그림 7의 시뮬레이션 회로 다이어그램과 같이 출력을 2개로 하여 직렬구조 Full-Bridge의 High Side와 Low Side의 각각 Full-Bridge의 입력으로 회생되기 때문이다.

스너버 전압 V_{sn} 이 일정하다고 가정하면 스위치 off 시 C_{sn} 에 유입되는 전력은 식 (1)과 같고 V_{sn} 에 유입되는 전력을 저항을 통해 소모해야 하므로 스너버 저항 값은 식 (2)와 같은 관계가 형성된다. 유효 저항 R_{eff} 는 식 (3)과 같으며 같이 나타낸 액티브 스너버의 입출력 관계로부터 시비율 D_a , 턴비 n_a , 인덕턴스 L_m 등을 결정한다. C_{sn} 의 전압 리플은 식 (4)와 같으며 5~10%정도가 적절한 값이다.

$$P_{sn} = V_{sn} i_{peak} \frac{t_s}{2} f_s = \frac{1}{2} L_{lk2} i_{Cj} (t_x)^2 \left(\frac{V_{sn}}{V_{sn} - V_{ss}} \right) f_s \quad (1)$$

$$P_{sn} = \frac{V_{sn}^2}{R_{sn}}, \quad R_{sn} = \frac{V_{sn}^2}{\frac{1}{2} L_{lk2} i_{Cj} (t_x)^2 \left(\frac{V_{sn}}{V_{sn} - V_{ss}} \right) f_s} \quad (2)$$

$$R_{eff} = \frac{(V_{in}/2)^2}{2P_{sn}}, \quad \frac{V_{in}/2}{V_{sn}} = \frac{D_a}{\sqrt{2L_m/(R_{eff}T_{sa})}} \quad (3)$$

$$C_{sn} = \frac{\Delta V_{sn}}{T_s} = \frac{V_{sn}}{R_{sn}}, \quad \Delta V_{sn} = \frac{V_{sn}}{C_{sn} R_{sn}} f_s \quad (4)$$

TABLE I
SPEC OF PROPOSED DC-DC CONVERTER CIRCUIT

Series-connected Full-Bridge Center Tap Converter	
V_{in}	$600V_{dc}$
P_o	$50V_{dc}/350A$ (17.5kW)
Switching frequency	60KHz
MCU(DSP IC)	TMS320F28335

3. 실험 결과

그림 8의 왼쪽 파형은 전압균형회로가 구동 중일 때의 파형으로 변압기 전류 파형이 시뮬레이션과 일치하며 대칭적이고 안정적인 모습을 보여주는 반면 오른쪽 파형은 전압균형회로를 구동하지 않을 때의 파형으로 변압기 전류 파형이 비대칭이며 불안정한 모습을 볼 수 있다. 실제 실험 시 출력 200A 부근부터 전압 불균형상태가 되었으며 최대부하인 350A 출력 시 상위 Full-Bridge와 하위 Full-Bridge의 전압이 약 20V정도 불균형을 보였다. 이러한 실험 결과를 통해 전압균형회로를 다이오드와 저항 그리고 캐패시터를 이용한 클램프 방식의 구조를 채택할 경우 Device 특성에 의한 불균형이 이루어질 가능성이 있으므로 MOSFET과 캐패시터를 이용한 Cell-Balancing 방식의 유용성을 확인하였다.

그림 9는 스너버의 종류에 따른 2차 정류기의 다이오드 역전압 Ringing 파형으로 왼쪽 파형은 액티브 스너버, 오른쪽 파형은 일반 스너버를 사용한 파형이다. 주목해야 할 파형은 파란색 파형인 V_D 로 다이오드 역전압 파형이다. 일반 RCD 스너버는 저항 R의 설계가 제한적이므로 Ringing 전압을 제한하는데 한계가 있는 것에 비해 액티브 스너버를 사용한 파형은 Ringing 전압의 주파수와 길이가 짧아 Ringing 전압 제한에 더 유리한 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 고주파 용접기용 컨버터를 설계하고 실험 및 검증하였다. 고주파화를 통한 변압기의 크기 및 무게를 줄이고 큰 저항이 필요한 RCD 스너버대신 액티브 스너버를 사용함으로써 불필요한 무게를 줄여 기존의 같은 용량 용접기에 비해 소형화 및 경량화가 이루어졌다.

효율은 최대부하 시 94.7%로 같은 용량의 기존 용접기들의 효율이 85~92%이므로 높은 스위칭 주파수에서의 특성이 좋은 MOSFET을 이용한 고주파 용접기의 전압균형회로와 스너버 손실의 일부를 입력으로 회생하며 높은 효율의 쇼트키 다이오드를 사용하기 위한 액티브 스너버의 유용성을 확인하였다.

이 논문은 현대중합금속(주)의 연구비 지원에 의하여 수행된 연구임.

References

- [1] C. J. Lee, Y. C. Kim and J. D. Kim, "Technology on arc welding machine of aluminum by digital control," *Journal of Korea Welding and Joining Society*, Vol. 31, No. 1, pp. 26-32, Feb. 2013.
- [2] S. K. Kwon and S. P. Mun, "Development of arc welding machines DC-DC converter using a novel full-bridge soft switching PWM inverter," *Journal of Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 22, No. 6, pp. 26-33, Jun. 2008.
- [3] K. M. Yoo, S. J. Kim, K. D. Kim, S. H. Park, Y. S. Byeon, S. B. Lim, and J. Y. Lee "LLC resonant converter design for uninterruptible power supply battery discharger," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 18, No. 3, pp. 240-246, Jun. 2013.



신준영(申漕永)

1988년 3월 18일생. 2014년 명지대 전기공학과 졸업. 2016년 명지대 전기공학과 졸업(석사). 현재 현대중합금속 용접기사업부 기술부 사원.



이재민(李在民)

1980년 12월 14일생. 2006년 순천향대 전기공학과 졸업. 2009년 순천향대 전기공학과 졸업(석사). 현재 현대중합금속 용접기사업부 기술부 대리.



최승원(崔承元)

1975년 7월 14일생. 1998년 경희대 전자공학과 졸업. 2000년 경희대 전자공학과 졸업(석사). 현재 명지대 전기공학과 박사과정.



이준영(李竣榮)

1970년 10월 3일생. 1993년 고려대 전기공학과 졸업. 1996년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 졸업(공학박사). 2001년~2005년 삼성 SDI PDP사업부 과장. 2005년~2008년 단국대 전기공학과 조교수. 2008년 현재 명지대 전기공학과 교수. 당 학회 편집위원.