

## 고정밀 와이어컷 방전가공기용 200W급 스위칭모드 전원장치 개발

정 인화, 김 종수, M.V. Pavlovets, 이 흥식, 임 근희, 이 병원<sup>\*</sup>  
한국전기연구원, 대우종합기계주식회사<sup>\*</sup>

### Development of 200W Switchmode Power Supply for Precision Wire-cut Electric Discharge Machine

In-Wha Jeong, Jong-Soo Kim, Mikhail V. Pavlovets, Hong-Sik Lee, Geun-Hie Rim, Byoung-won Lee  
Korea Electrotechnology Research Institute, Daewoo Heavy Industries & Machinery Ltd.<sup>\*</sup>

**Abstract** - 높은 정밀도와 고품위 가공이 요구되는 금형 제작 등에서 사용되는 고정밀 와이어컷 방전가공기가 고속, 고정밀 가공특성을 갖기 위해서는 무엇보다도 제어와 출력특성이 우수한 고성능의 전원장치가 필요하다. 본 논문에서는 고정밀 와이어컷 방전가공기용 스위칭모드 보조 전원장치로 사용되는 200W 280Vdc 영전압 포워드 컨버터 개발에 대해 기술하고 있다.

#### 1. 서 론

현재 고정밀 와이어컷 방전가공기의 기술개발은 고속, 고품위의 다양한 금형가공에 높은 신뢰성과 경제성을 부여하도록 진행되고 있다. 이를 위해 고정밀, 고효율 전원장치 개발과 자동결선, 리니어 모터와 같은 고성능 기구부 설계, 그리고 사용자에게 최적의 작업환경을 가져다 줄 수 있는 제어장치 개발이 동시에 이루어지고 있다. 또한 현재 사용되고 있는 DC 펄스 전원장치가 방전가공 작업 중, 전기분해에 의해 가공물 표면에 전해부식을 발생시키어 가공면의 품질과 수명을 떨어뜨리기 때문에 이런 문제점을 해결하기 위해 AC 펄스 전원장치의 개발 필요성이 강조되고 있다. 이러한 특징을 갖는 고성능 AC 펄스 전원장치를 개발하기 위해서는 대전류 펄스를 짧은 시간에 제어할 수 있는 스위칭 구동회로와 모듈설계가 최적으로 이루어져야 하며 고정밀 방전가공의 효율적인 제어를 위해 내부에 사용되는 보조 전원장치들 또한 정밀도와 안정성이 충분히 확보되어야 한다. 본 논문에서는 고정밀 와이어컷 방전가공기의 AC 펄스 전원장치에 적용될 200W 280Vdc 고정밀 보조 전원장치의 설계와 제작 및 실험 결과에 대해 소개하고자 한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 동작 원리

일반적으로 하나의 MOSFET으로 이루어진 플라이백 컨버터는 대개 150W이하의 정격출력에서 사용되어지며 이런 이유로 200W 280Vdc 보조 전원장치에서는 스위칭 손실과 MOSFET에 인가되는 스트레스를 낮추기 위해서 영전압 스위칭이 가능한 공진형 포워드 컨버터 기술을 적용하였다.

200W 280Vdc 보조 전원장치에 적용된 영전압 포워드 컨버터의 회로도가 그림 1에 보여지고 있다. 적용된 컨버터의 인덕턴스 성분  $L_r$ 은 변압기의 1차측 누설 인덕턴스와 변압기에 직렬로 연결된 인덕터의 합으로 이루어져 있으며 이는 MOSFET의 스위칭 손실을 줄이기 위한 공진회로를 구성하기 위해 사용된다. 또한 변압기 1차측에 병렬로 연결된 MOSFET  $Q_a$ 와 클램프 캐패시터  $C$ 는 주전류를 스위칭하는 MOSFET  $Q_m$ 에 인가되는 전압과 스트레스를 제한하기 위해 추가로 사용되어 진다.

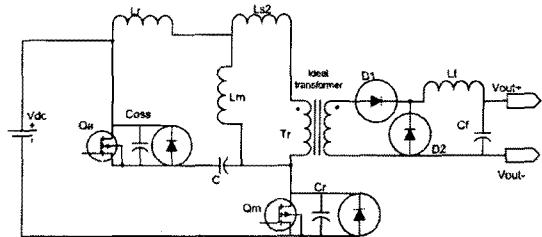


그림 1. 200W 보조 전원장치에 적용된 영전압 포워드 컨버터

그림 2-a, 2-b에서는 컨버터의 동작 파형을 보여주고 있다. 여기서  $V(Q_m:g) - V(Q_m:s)$ 과  $V(Q_a:g) - V(Q_a:s)$ 는 각각 MOSFET  $Q_m$ 과  $Q_a$ 에 인가되는 게이트 전압을 의미하며  $V(Q_m:d)$ ,  $ID(Q_m)$ 는 주전류를 스위칭하는 MOSFET  $Q_m$ 의 전압과 전류를 나타낸다. 또한  $B(Tr)$ ,  $V(Tr)$ 는 변압기의 자속밀도와 인가되는 전압파형을 보여주고 있다.

##### 초기 조건 : $t = t_0$

초기 상태에서 MOSFET  $Q_m$ 과 포워드 다이오드  $D1$ 이 모두 도통된 상태라고 가정하면 이때 입력전력은 변압기 를 거쳐 다이오드  $D1$ 을 통해 출력측에 전달되게 된다.

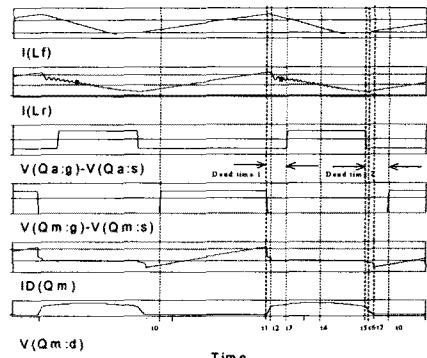


그림 2-a. 200W 영전압 포워드 컨버터의 동작 파형

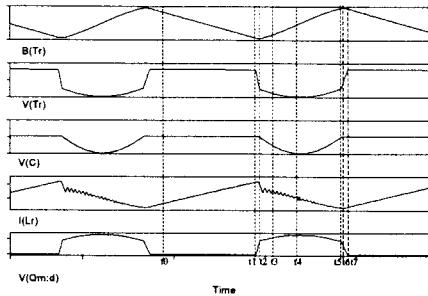


그림 2-b. 200W 영전압 포워드 컨버터의 동작 과정

#### Interval time : $t_0 < t < t_1$

이 모드에서의 동작은 기존 PWM 포워드 컨버터의 동작과 일치하는데 이때 주 스위치인 MOSFET  $Q_m$ 과 포워드 다이오드 D1이 도통 상태이며 다이오드 D2는 역 방향으로 바이어스 된다. 입력 전압  $V_{dc}$ 는 변압기의 1차 측에 인가되고 자화 전류가  $V_{dc}/L_m$ 의 기울기를 갖고 상승하여 변압기의 2차 출력측에 에너지를 전달하게 된다. 그림 3은 이 모드에서의 컨버터 동작회로를 보여주고 있다.

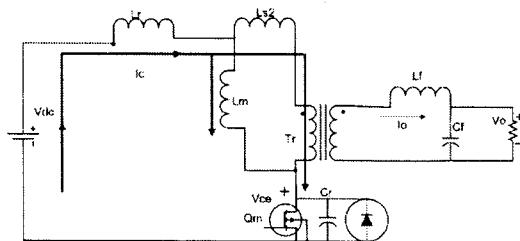


그림 3.  $t_0 < t < t_1$  모드에서 포워드 컨버터 동작 회로

#### Interval time : $t_1 < t < t_2$

두 번째 모드는 MOSFET  $Q_m$ 이 턴-오프 될 때 시작된다. 이때 MOSFET  $Q_m$ 의 기생 캐패시터  $C_r$ 은  $V_{dc}$  전압까지 선형적으로 증가하고 MOSFET  $Q_a$ 의 기생 캐패시터  $C_{oss}$ 는 병렬 다이오드를 역 바이어스 시키고 있던 충전 전압을 방전하게 된다.

#### Interval time : $t_2 < t < t_3$

MOSFET  $Q_m$ 에 걸리는 전압  $V_{ce}$ 가 입력전압  $V_{dc}$ 에 도달하는 시점인  $t_2$ 에 이르면 포워드 다이오드 D1은 턴-오프 되며 출력측 인덕터  $L_f$ 에 흐르는 전류는 역방향 다이오드 D2를 통해 순환하게 된다. 이와 동시에 1차측 자화 전류는 MOSFET  $Q_a$ 에 역병렬로 연결된 다이오드를 통해 흐르게 되고 이 전류는 직렬로 연결된 클램프 캐패시터  $C$ 를 충전시키게 된다. 이 결과 MOSFET  $Q_m$ 이 턴-오프 되어도 급격한 전압 상승이 억제되어 주 스위치인  $Q_m$ 에 가해지는 스트레스를 현저히 감소시킬 수 있게 된다. 이때  $Q_m$ 에 걸리는 전압  $V_{ce}$ 는  $V_{dc} + V_c$ 에 제한되게 된다. 그림 4는 이 모드에서의 등가회로를 나내고 있다.

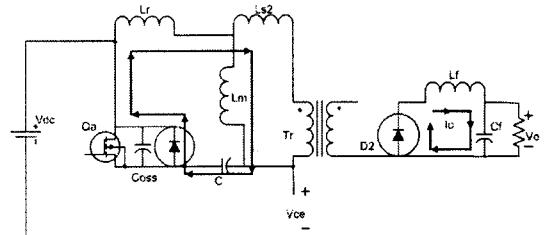


그림 4.  $t_1 < t < t_4$  모드에서 포워드 컨버터 동작 회로

#### Interval time : $t_3 < t < t_4$

주 스위치인 MOSFET  $Q_m$ 이 턴-오프 되고 보조 스위치인 MOSFET  $Q_a$ 가 도통되기 위해서는 회로의 안전한 동작을 위해 약간의 지연시간이 필요하며 이 시간이 지나는  $t_3$ 되는 시점에서 보조 스위치  $Q_a$ 는 도통하게 된다. 이 순간에 역병렬로 연결되어 있는 다이오드는 도통 상태이므로  $Q_a$ 는 스위칭 손실을 크게 줄일 수 있는 영전압 스위칭이 가능하게 되는 것이다.

#### Interval time : $t_4 < t < t_5$

그림 5에서는 보조 스위치 MOSFET  $Q_a$ 가 도통된 이후 자화 전류의 방향이 역방향으로 바뀐 상태에서의 등가회로를 보여주고 있다. 이 모드 동안에 2차측 출력단에 에너지를 공급하기 위해 자화되어 있던 변압기는 역방향으로 자속이 흐르게 되어 한쪽 방향으로 포화되지 않고 안정되게 동작하게 된다.

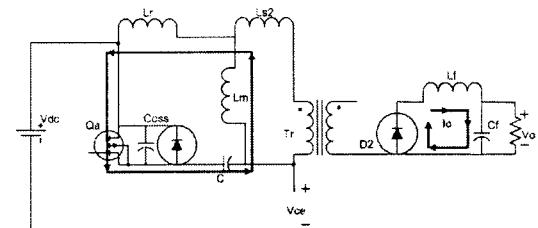


그림 5.  $t_4 < t < t_5$  모드에서 포워드 컨버터 동작 회로

#### Interval time : $t_5 < t < t_6$

보조 스위치 MOSFET  $Q_a$ 가 턴-오프 되는 시점인  $t_5$ 에서  $Q_a$ 의 기생 캐패시터  $C_{oss}$ 에서는 충전이 이루어지고 이와 동시에 MOSFET  $Q_m$ 의 기생 캐패시터  $C_r$ 은 병렬 다이오드를 역 바이어스 시키고 있던 충전 전압을 방전하게 된다. 이때의 등가회로는 그림 6에서 살펴볼 수 있다.

#### Interval time : $t_6 < t < t_7$

전압  $V_{ce}$ 가 입력전압  $V_{dc}$ 에 도달하는 시점인  $t_6$ 에 이르면 변압기 1차측 양단에 걸리는 전압값은 영이 되며 이후  $V_{ce}$ 가 영전압에 이르는 시점인  $t_7$ 까지 캐패시터  $C_r$ 은 계속해서 방전하게 된다.

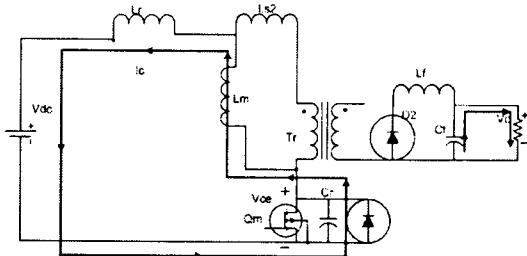


그림 6.  $t_5 < t < t_6$  모드에서 포워드 컨버터 동작 회로

Interval time :  $t_7 < t < t_0$

캐패시터  $C_r$ 의 방전이 이루어진 후 주 스위치인 MOSFET  $Q_m$ 이 다시 도통하기 위한 지연시간 동안 자화 전류는  $Q_m$ 에 역병렬로 연결된 다이오드를 통해 흐르게 되고 이를 통해  $Q_m$ 의 도통시 영전압 스위칭이 가능하게 된다. 참고로 200W 보조 전원장치에 적용된 영전압 포워드 컨버터는 출력측 인더터에 흐르는 전류가 항상 영보다 크도록 연속 모드에서 동작하도록 설계되었다.

## 2.2 실험 결과

그림 7-8은 대우종합기계(주)에서 생산중인 고성능 저가격의 중형 와이어컷 방전가공기의 외관과 내부 전원장치의 모습을 보여주고 있다.

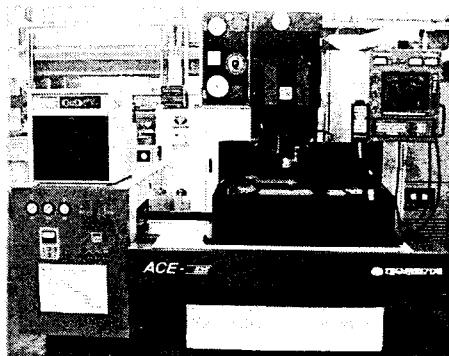


그림 7. 현재 생산중인 와이어컷 방전가공기 (ACE-W535)

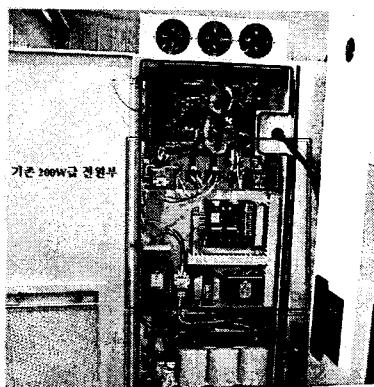


그림 8. 위상제어 방식의 기존 전원장치부

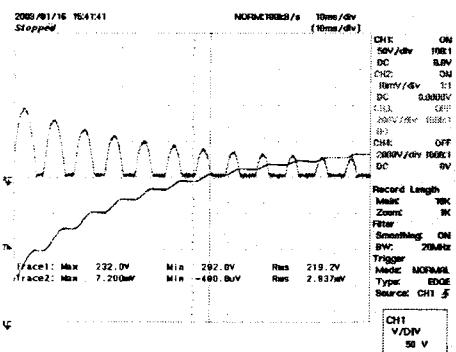


그림 9.  $V_{ac} = 220V$  입력전압 인가시, 기존 200W 전원장치의 출력전압(50V/div)과 dc link 충전전류(5A/div) 과정

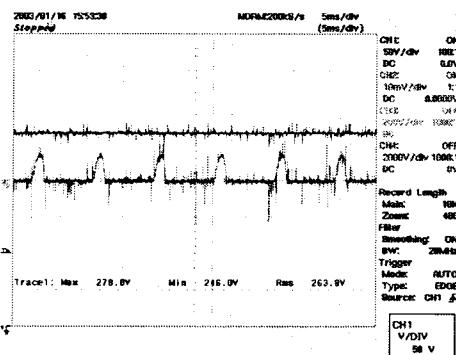


그림 10. 동작 대기시, 기존 200W 전원장치의 출력전압(50V/div)과 dc link 충전전류(0.5A/div) 과정

그림 9-10은 현재 사용중인 200W 위상제어 전원장치에 입력전압을 인가할 때와 동작 대기중일 때의 동작특성을 보여주고 있다. 그림 9에서 보듯 280Vdc 출력전압에 도달하기 위해서는 150ms의 안정화 시간을 필요로 하며 초기에 비교적 큰 리플전류를 확인할 수 있다. 그림 10은 동작 대기시에도 10W 정도의 전력손실이 발생함을 나타내고 있다. 또한 현재의 전원장치는 입력부에 변압기를 이용하여 입력전압의 90% 정도로 감압된 전압을 정규시켜서 사용하기 때문에 입력전압 변동에 큰 영향을 받고 있다.

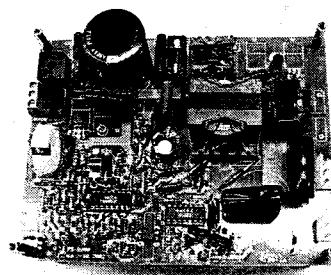


그림 11. 200W 보조 전원장치용 영전압 포워드 컨버터

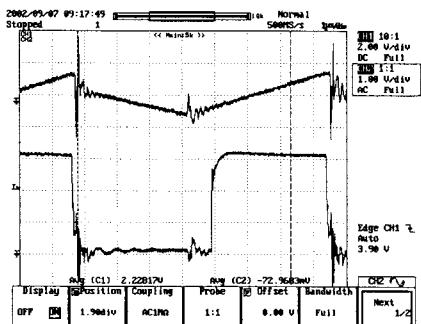


그림 12. Vdc= 250V 입력전압에서 주 스위치 Qm의 전류(5A/div)와 게이트 전압(4V/div) 파형

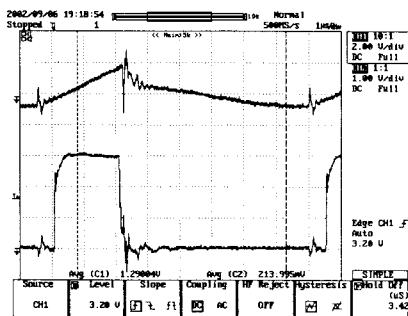


그림 13. Vdc= 370V 입력전압에서 주 스위치 Qm의 전류(5A/div)와 게이트 전압(4V/div) 파형

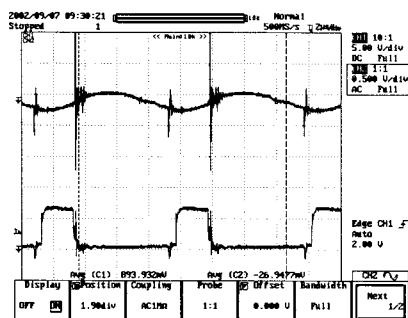


그림 14. Vdc= 370V 입력전압에서 출력의 리플 전압(0.5V/div)과 Qm의 게이트 전압(10V/div) 파형

200W 280Vdc 보조 전원장치에 사용된 영전압 포워드 컨버터의 설계 조건은 다음과 같다.

- 입력 전압 : 220Vac  $\pm 15\%$
- 출력 전압 : 280Vdc
- 출력 전력 : 200W
- 스위칭 주파수 : 115kHz

그림 11에서는 제작된 200W 280Vdc 보조 전원장치용 영전압 포워드 컨버터를 보여주고 있으며 실험 결과는 그림 12-14에서 나타내어지고 있다.

그림 12-13은 입력전압이 정격값의  $\pm 15\%$  상태인 250Vdc와 370Vdc에서의 주 스위치 Qm에 흐르는 전류와 게이트 전압파형을 보여주고 있다. 실험 파형에서 보

듯 주 스위치에서 영전압 스위칭이 잘 이루어지고 있음을 확인할 수 있고 이는 실험에 앞서 이루어진 시뮬레이션 결과와도 일치하며 이때 스위치에 인가되는 전압이 클램프 캐패시터에 의해 최소한의 값으로 제한됨을 살펴볼 수 있었다.

그림 14는 최대 입력전압에서 동작 중인 컨버터의 출력전압 파형을 보여주고 있다. 이때 출력전압 변동율은 0.1% 정도이고 Voltech사의 Universal Power Analyzer, PM3000A로 측정한 컨버터의 효율은 91.5% 정도로 기존에 생산되는 SMPS에 비해 6-7% 정도 효율이 우수하였다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 고정밀 와이어컷 방전가공기의 AC 펄스 전원장치에 적용될 200W 280Vdc 보조 전원장치의 동작 원리와 제작 및 실험 결과에 대해 기술하였다. 기존 위상제어 방식의 전원장치와 비교해서 크기와 무게 면에서 큰 장점을 가지고 있으며 유연하고 정밀한 출력전압 제어가 가능하다는 특징과 함께 실험 결과에서 보듯 0.1% 미만의 출력전압 변동율을 가지며 효율은 91.5% 이상임을 확인할 수 있었다. 또한 현재 사용 중인 위상제어 방식의 전원장치에서는 동작 대기시에도 내부 저항에 의해 10W(5%) 정도의 전력손실이 발생하였고 출력전압의 변경도 정밀하게 이루어지지 않았으며 무엇보다도 입력전압에 비례하여 출력전압도 변동하는 큰 문제점이 존재하였다. 이에 반해 개발된 영전압 포워드 컨버터는 빠른 응답속도를 갖으며 다양한 출력전압으로 조정될 수 있었으며 입력전압에 따른 출력전압 변동이 거의 없었다. 그러나 컨버터의 안정된 동작을 위해 기존 전원장치보다 100ms정도 긴 260ms의 Soft-Start time을 필요로 한다. 앞으로 전원장치의 효율을 극대화하기 위하여 스위칭 회로와 소자선정에 세밀한 고려가 있어야 하겠으며 아울러 방전가공 중에 발생하는 노이즈로부터 전원장치가 안정되게 동작하도록 출력피드백 회로와 필터회로 설계에 주의를 기울여야 할 것으로 사료된다.

### (참 고 문 헌)

- [1] C. Duarte and I. Barbi, "A Family of ZVS-PWM Active-Clamping DC-to-DC Converters: Synthesis, Analysis, Design, and Experimentation," IEEE Transactions on Circuits and Systems - I: Fundamental Theory and Applications, Vol. 44, No. 8, pp. 698-704, Aug., 1997.
- [2] P. Heng and R. Oruganti, "Family of Two-Switch Soft-Switched Asymmetrical PWM DC/DC Converters," IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 85-94, 1994.