

방전 플라즈마 소결접합용 저전압, 대전류 사이리스터 정류기 개발

이을재¹, 최정수², 김영석³
 이경산전(주)¹, 경기공업대학², 인하대학교³

Development of Low Voltage, High Current Thyristor Converter for Spark Plasma Sintering

Eul-jae Lee¹, Jung-soo Choi², Young-seok Kim³
 E-Kyoung Sys.¹, Kyounggi Institute of Tech.², Inha Univ.³

Abstract - 본 논문은 새로운 개념의 방전 플라즈마 소결 접합장비에 적용된 출력펄스 가변형 저전압, 대전류 사이리스터 정류기의 개발에 대하여 설명하고 있다. 6펄스 형태로 개발된 대용량 출력펄스 가변형 정류기는 공냉식으로 제작되어 기존의 대용량 정류기에서 적용한 수냉식보다 구조가 단순하며 최대 11600A의 출력을 펄스 단위로 반복적으로 차단 및 전류하는 것이 가능하도록 설계되었다. 전류분배를 위한 버스바의 형태는 기구적인 설계만으로 간단히 대전류를 분배할 수 있도록 하였으며 디지털 연산에 의한 PLL 방식으로 입력 전압의 동기화 필요하지 않다. 시뮬레이션과 실물부하를 연결한 실험을 통해 제안한 방법 및 성능의 우수성을 조사하였다.

자가 필요하므로 현실적으로 초퍼로 회로를 구성하는 것은 바람직하지 못하다. 본 논문에서는 이러한 문제점의 해결방안으로 사이리스터를 이용한 위상제어 정류기를 펄스 발생장치로 사용하는 방법에 대하여 연구하였다. 위상제어 정류기는 출력의 발생이 교류입력의 상회전에 따라 펄스형태로 발생하며 접호신호를 제어함으로써 그룹 1에서의 가변 On-Off 펄스열의 출력을 근사적으로 발생시킬 수 있다. 강압된 출력전압 역시 트랜스포머를 이용하여 간단히 해결할 수 있어서 전력회로를 단순화할 수 있다. 이와 함께 위상제어 컨버터는 구조의 강인성으로 인하여 여타의 전력변환기, 예를 들면 GTO 인버터, IGBT 컨버터 등에 비하여 고장의 발생이 적은 등 다른 방식의 변환회로에 비하여 경제성이 높은 장점이 있다[1-2]. 본 연구에서는 각 소자당 출력전류의 부하분담률이 적은 6 펄스 센터탭 컨버터를 적용하여 DC 펄스 제네레이터를 개발하였다.

1. 서 론

산업기술이 고도화됨에 따라 제품생산에 필요한 공구 및 금형 수명과 정밀도가 고기능 제품 생산에 미치는 영향은 매우 크다. 이에 따라 공구와 금형 산업계에서는 표면개질 및 접합공정에 의해 고정밀도 및 내구성을 향상시키기 위한 기술개발을 추진해 왔다.

최근 국외에서는 새로운 소결접합방법으로써 방전 플라즈마 소결접합장비가 개발되어 현재 이를 이용한 새로운 소결접합법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재까지 파악된 바에 의하면 소결온도가 높거나, 소결온도에 제한 받는 분야, Fine Ceramics 소결, 급냉 용고분(비정질 재료)의 소결, 경사 기능형 재료의 동시 소결접합, 금속간 화합물을 포함한 신합금 소결 및 합성 초전도체 또는 열전 반도체의 소결, Co 0% 고경도 초경합금 등에 대한 적용이 활발히 진행되고 있다.

방전 플라즈마 소결접합법은 분체 자체의 아아크 방전을 이용한 것으로, 대전류를 On-Off함으로써 기존의 방법보다 저온에서 단시간의 소결이 가능한 장점이 있다. 방전 플라즈마 소결접합을 구현하기 위한 필수 장비로써 대전류의 On-Off 제어가 가능한 제어전원이 요구된다. 본 논문에서는 소결접합용 플라즈마 발생을 위한 대전류 DC 펄스 제네레이터의 설계 방법에 대하여 설명하였으며 시뮬레이션과 실물부하에 대한 실험을 통해 제안된 방식의 효용성을 확인하였다.

2. 대용량 DC 펄스 제네레이터의 설계

2.1 컨버터부의 조건

플라즈마 발생을 이용한 저온 소결방식에서 부하전류의 형태는 그림 1과 같이 대전류의 순간적인 차단과 통전을 반복적으로 가하는 구조로 되어 있으며 그림에 나타난 바와 같이 차단과 통전의 비를 임의로 제어하는 것이 필요하다. 대전류의 순시적인 차단과 통전을 위한 전력회로 방식으로는 초퍼를 이용하는 것이 회로적으로 단순화될 수 있으나 출력의 전압이 수십 볼트 이하이므로 초퍼의 입력단에 전압변환 회로가 필요하고 또한 순시 차단 능력이 10,000A 이상의 자기소호형 고속 스위치 소

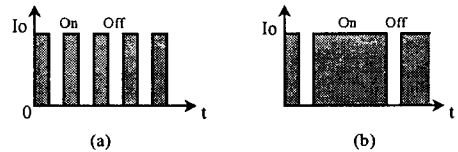


그림 1 플라즈마 소결방식에서 부하전류 형태
 (a) On-Off 1:1 출력펄스 제어
 (b) On-Off 12:2 출력펄스 제어

표 1 플라즈마 소결접합용 DC 펄스 제네레이터 사양

항 목	내 용
경격	120kW
입력전압	220VAC, 60Hz 5±%, 3상
입력전류	480A
제어회로방식	16Bit Micro Controller Digital 제어
제어방식	Digital PLL 제어
주회로소자	Thyristor
냉각방식	강제공냉식
최대출력전류	11600A
최대출력전압	15Vdc
정격출력전압	12Vdc
보호기능	입력저전압, 입력과전압, 출력과전류, 출력단락, 소자과열, 제어기 고장
표시기능	On-Off 펄스카운트, 출력전압, 출력전류, 고장내용, 누적시간사용
효율	85% 이상
소음	65dB 이하
사용온도	-25℃ ~ 45℃
습도	20% ~ 90%
외관[mm]	1800(H)×1200(L)×1400(W)

2.2 주회로 구성

그림 2는 개발된 대용량 DC 펄스 제네레이터의 주회로 구성을 나타낸 것이다. 6펄스 센터탭형 컨버터는 각 사이리스터 암이 입력전압의 60° 구간 동안에만 통전되므로 브리지 형태의 컨버터에 비하여 사이리스터의 통전 손실이 50% 감소한다. 주회로는 트랜스의 초기 여자전류를 제한하고 입력의 접속과 차단을 제어하는 입력부, 6펄스 컨버터부, 제어부 및 표시부로 구성되며 단일 외함 내에 설치된다.

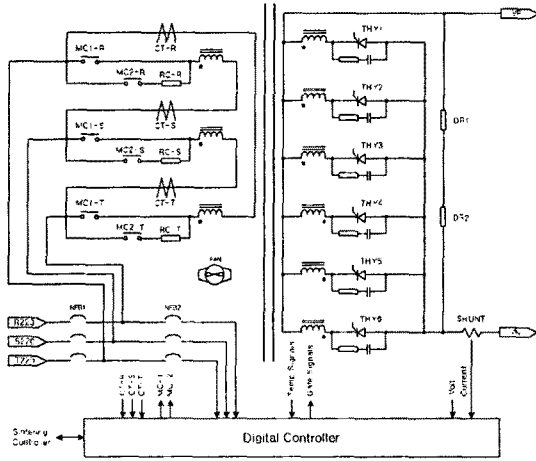


그림 2 주회로 구성도

2.3 사이리스터 소자의 선정

DC 펄스 제네레이터의 목표출력전류는 사양에 나타낸 바와 같이 12Vdc에서 10,000A 연속이다. 1상의 사이리스터에 흐르는 평균전류 I_t 는 아래와 같다.

$$I_t = I_o / 6 = 0.167I_o \quad (1)$$

여기에서 I_o 는 출력 평균전류를 나타내며 이를 다시 rms 값으로 표현하면 다음과 같다.

$$I_{trms} = I_o / \sqrt{6} = 0.4082I_o \quad (2)$$

식 (2)로부터 한 상의 사이리스터에 흐르는 rms 전류는 $10,000 \times 0.4 = 4,000A$ 가 된다. 하지만 출력전류에는 Off 구간이 존재하고 Off 구간을 포함하여 평균 10,000A를 출력해야 하므로 2배 이상의 충분한 여유율을 갖도록 하기 위하여 적용 사이리스터는 2250A급(ABB5STP21F1200)을 4병렬 형태로 사용하였다.

표 2 적용 사이리스터의 전기적 특성

V_{RMS}	I_{TAVM}		I_{TSM}		V_{TO}	r_T	T_{VJM}	R_{thC}	R_{thCH}
	$T_c=70^\circ C$	8.3ms	10ms						
V	A	kA	kA		V	mΩ	°C	K/kW	
1200	2250	26.0	25.0	0.74	0.16	125	15	10	

2.4 사이리스터 병렬운전을 위한 스택 설계

개발된 DC 펄스 제네레이터에서는 4개의 사이리스터 소자를 병렬로 운전하도록 설계하였는데 이는 출력전류의 허용한도가 시판중인 최대 사이리스터의 정격을 초과하기 때문이다. DC 펄스 제네레이터는 순시 10,000A

상의 전류를 스위칭하므로 각 소자간 전류의 불균형은 턴온과정에서 전류의 병목현상을 초래하여 소자의 파괴를 야기한다. 이러한 전류 불균형의 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 그림 3에 표현된 방법에 의하여 사이리스터 스택을 제작하였다. 병렬로 접속된 각각의 사이리스터는 버스바의 시작점으로부터 전류경로가 정확히 동일한 길이를 갖는다. 이렇게 함으로써 각각의 사이리스터에는 동일한 저항과 인덕턴스가 제공되므로 사용자 소자의 특성이 일치한다면 과도상태에서도 동일한 특성을 얻을 수 있게 된다.

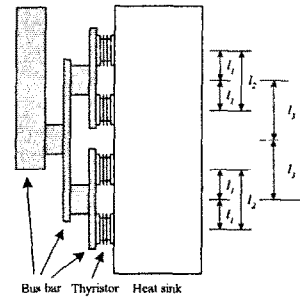


그림 3 전류분배를 고려한 사이리스터 스택

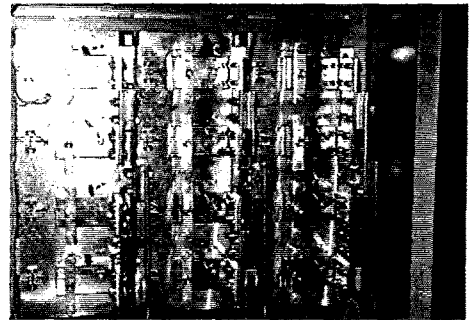


그림 4 병렬 사이리스터 스택의 형태

2.5 디지털 제어기의 설계

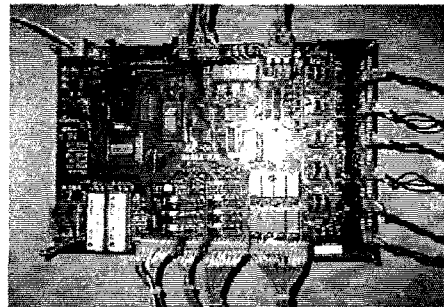


그림 5 디지털 제어기

그림 5에 디지털 제어기의 PCB를 나타내었다. 제어기 CPU는 Intel사의 단일칩 마이크로컨트롤러인 80C196KC를 사용하여 제작하였다. 80C196KC 내부에는 AD 컨버터를 비롯한 각종 주변회로가 내장되어 있어서 하드웨어의 구성이 대폭 단순해지는 장점이 있으며 특히 HSO (High Speed Output) 기능을 사용하여 6개의 게이트 신호를 효율적으로 제어하는 것이 가능하다. 그림 6은 디지털 제어부의 구성을 나타낸 것이다.

본 연구에서는 디지털적으로 구현이 용이한 위상추적 점호방식을 사용하여 사이리스터의 점호주기를 제어하였다[3]. 제어방법은 입출력간의 오차전류에 적당한 이득을 가하여 사이리스터를 On시킬 시간간격을 결정한 뒤에 이 시간 간격으로 타이밍 인터럽트를 발생시킨다. 인터럽트 루틴에서는 출력상의 회전방향에 따라 해당 사이리스터를 순차적으로 점호시킨다. 이때 점호 펄스와 입력 전원이 자동적으로 동기가 되므로 입력전원의 동기를 위해 별도의 위상정보를 필요로 하지 않는 특징이 있다.

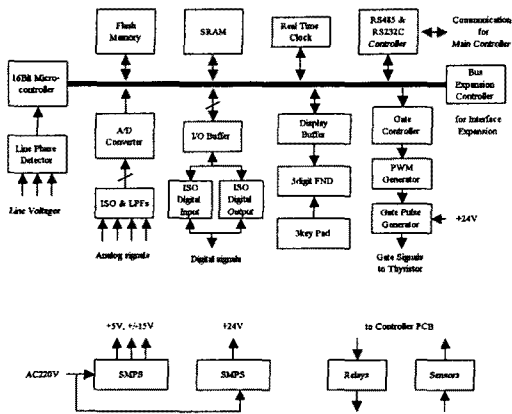


그림 6 디지털 제어부의 구성

3. 실험결과 및 검토

그림 7은 방전 플라즈마 소결시스템의 구성도를 나타낸 것이다. 시스템의 구성은 진공챔버, 소결제어기 및 DC 펄스 제네레이터로 이루어진다. 시험소결용 분말시편(Powder compact)은 몰드형상(Die) 내부에 존재하며 진공챔버내에서 약 40~60ton/cm²의 압력이 상하의 펀치를 통해 가해진다. 시험에 사용된 분말시편은 텅스텐 합금 계열로서 기존 소결방식인 온도제어 방식으로는 소결되지 않는 물질이다. DC 펄스제네레이터의 제어입력으로는 0~10V의 직류전압이 사용되며 0~10,000A의 출력을 발생하는데 이용된다. 소결시스템에 전원이 인가되면 소결제어기로부터 입력 컨택터 On 신호가 발생되며 DC 펄스 제네레이터는 이 때부터 제어 입력의 조건에 따른 전류출력을 발생시킨다.

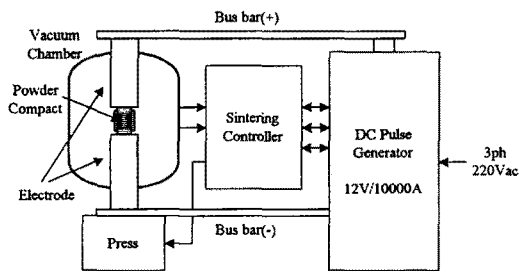
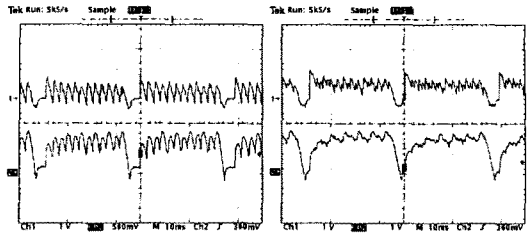


그림 7 방전플라즈마 소결시스템의 구성도

그림 7-(a)는 출력전류 2,500A 일때에 DC 펄스 제네레이터의 출력전압 및 전류 파형을 나타낸 것이다. 출력펄스의 비율은 12:2로 On 지속시간은 33.33msec, Off 지속시간은 5.55msec, 주파수는 25.7Hz이다. 그림 (b)는 출력전류 5,000A에서 전압과 전류의 파형을 나타낸 것이다. 누설 인덕턴스가 증가하여 출력전류의 파형이 경부

하시보다는 약간 왜곡되어짐을 볼 수 있다. 그림 (c)는 최대허용 출력인 10,000A를 인가하였을 때의 출력 파형이다. 그림 (b)에서와 마찬가지로 누설 인덕턴스의 영향이 조금 더 증가하였음을 볼 수 있다.

실험 결과 시편으로 사용한 혼합 파우더는 운전 15분이 경과 후에 완전한 소결합금으로 변환되었다.

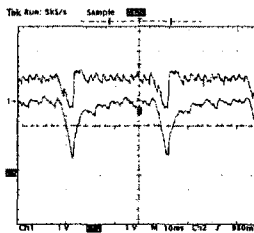


1. 출력전압 10V/div
2. 출력전류 2000A/div

(a) 2,500Arms 출력시

1. 출력전압 10V/div
2. 출력전류 4000A/div

(b) 5,000Arms 출력시



1. 출력전압 10V/div
2. 출력전류 4000A/div

(c) 10,000Arms 출력시

그림 7 DC 펄스제네레이터 출력파형

3. 결 론

방전 플라즈마 소결점함을 구현하기 위한 대용량 DC 펄스 제네레이터를 대전력 사이리스터를 사용하여 개발하였다. 개발된 장치는 다음과 같은 특징을 갖는다.

- 1) 회로의 구성에 있어서 대전력 소자를 사용함으로써 기존 시스템에 비하여 가능한한 단순화를 추구하였으며 이로 인하여 고장발생 요소의 저감, 유지 및 보수 기능의 강화를 이루었다.
- 2) 대부분의 기능을 소프트웨어와 디지털 회로에 의존 로직화를 함으로써 기존의 아날로그 방식에서와 같은 복잡한 제어회로의 구성에서 탈피하도록 하였으며 이로 인하여 제어의 정확성, 안정성이 한층 더 향상되었다.
- 3) 특히 일반 위상제어 컨버터와는 달리 출력에 대하여 펄스 카운트 기능을 적용하여 연속 반복적인 동기식 On-Off 제어가 가능하며 운전중 펄스비의 상태변경이 가능토록 하였다.
- 4) 사용자의 편의성 측면에서는 시스템의 제어에 통신기능을 포함시킴으로써 On-Line Supervising 기능이 추가되어 향후 시스템의 확장에 대하여 준비할 수 있도록 설계하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Kavid Finney, McGraw Hill "The Power Thyristor and its Applications" 1980
- [2] Thomas H. Barton "Rectifiers, Cycloconverters, and AC Controllers", Clarendon press. Oxford, 1994
- [3] Eui-Hi Song, Bong-Hawn Kwon "Direct Digital Control of the Phase-Controlled Rectifier", IEEE Trans., vol. 38, No. 5, pp. 337-343, Oct. 1991