

A Pulse Power Supply for a Metal Vapor Laser Using IGBTs

陳 瑄 泰* · 車 秉 憲** · 金 哲 中*** · 李 興 浩§
(Jeong Tae Jin · Byung Heon Cha · Cheol Jung Kim · Heung Ho Lee)

Abstract - A pulse power supply using IGBTs and MPC (magnetic pulse compression) circuit was developed for a metal vapor laser. The life time of the pulse power supply is expected to be much longer than that of a vacuum tube or thyatron type pulse power supply. A series-connected IGBT array generated a long pulse of its pulse width 2 μ s and then it was compressed to less than 100 ns by a three stage MPC circuit. This pulse power supply was applied to a laser plasma tube of 10 mm inner diameter and 0.5 m discharge length, and successfully operated.

Key Words : IGBT, Pulse Power Supply, Copper Vapor Laser, Metal Vapor Laser

1. 서 론

수 10 kV, 수 100 A, 수 kHz의 고반복율로 동작하는 고전압, 대전력 펄스 전원은 펄스 레이저 분야, 공해물질 제거 분야 등 산업계 여러 분야에서 널리 활용된다[1,2,3,4]. 이들 고전압 펄스 전원의 핵심 부품은 펄스 스위치이며 진공관이 나 사이라트론(thyatron) 등 진공관식 스위치가 주로 사용되고 있다. 그러나 이들 진공관식 펄스 스위치는 전기적 특성이 뛰어난 반면 그 구조상 동작 수명이 짧은 단점이 있다 [5,6]. 이는 고전압 펄스 전원의 유지보수 비용 증가를 가져오며 특히 다수의 펄스 전원을 장시간 연속적으로 동작시키는 대규모 시스템에서는 큰 문제가 된다. 따라서 고전압 펄스 스위치의 수명 연장을 위한 대책이 필요하며 진공관식 스위치를 전력반도체 스위치로 대체하는 것이 한 방법이다 [7,8].

전력반도체 스위치에는 사이리스터, GTO, 트랜지스터, MOSFET, IGBT 등 여러 종류가 있으며 정격에 맞게 사용하면 그 수명은 거의 영구적이라고 할 수 있다. 전력 반도체 스위치 중 고반복율, 고전압, 대전류 펄스 전원용으로는 IGBT가 가장 적합하다고 알려져 있다[9,10]. 그러나 현재 시판되는 전력 IGBT의 전압 정격은 수 kV 가 한계이며 펄스 상승시간 및 하강시간이 수 100 ns 이상인 점을 고려하면 스위칭이 가능한 펄스 폭은 1~2 μ s 정도가 한계이다. 따라서 수 10 kV 이상의 고전압을 수 100 ns 이하의 펄스폭으

로 스위칭시키기 위해서는 다수의 전력 IGBT를 직렬 연결하고 이와 더불어 전력 IGBT 스위치가 스위칭 할 수 있는 한계인 수 μ s 의 펄스를 수 100 ns 이하의 펄스로 압축시켜야 한다[11,12].

본 연구에서는 직렬 연결한 다수의 IGBT와 자기펄스압축 (magnetic pulse compression) 기술을 사용하여 고전압, 대전류의 고반복 스위칭이 가능한 금속증기 레이저용 펄스 전원을 설계, 제작하여 그 특성을 조사하였으며 레이저 방전관을 부하로 사용하여 장시간 시험 운전함으로써 안정성을 확인하였다.

2. 펄스 전원 설계, 제작

제작된 펄스 전원은 그림 1과 같이 다수의 IGBT를 직렬 연결한 IGBT 스위치 어레이 (IGBT switch array)와 IGBT 스위치 어레이에서 스위칭된 펄스를 압축시키는 자기펄스 압축회로의 2 부분으로 구성된다. 그림 1에서 고전압 전원 HVDC에 전원이 투입되면 HVDC에서 공급되는 전류는 커패시터 뱅크 C_B 및 충전용 인덕터 L_C , 충전용 다이오드 D_C 를 거쳐 C_0 , C_1 이 HVDC 전압 V_C 의 2배인 V_{2C} 로 충전된다. C_0 , C_1 이 V_{2C} 로 충전된 뒤 트리거 펄스에 의해 IGBT 스위치 어레이가 통전 (turn-on)되면 C_0 에 충전되었던 V_{2C} 전위의 전하는 LC 반전 (inversion)되어 V_1 의 전위는 $-2V_{2C}$ 의 전위가 된다. 이어서 가포화 인덕터 (saturable inductor) L_1 이 포화되면 직렬 연결된 C_1 과 C_0 양단에 축적된 전하는 C_2 로 이동하고 순차적으로 C_3 , C_{PK} 로 이동하면서 전류 진폭이 증폭됨과 동시에 펄스폭이 압축된다.

IGBT 스위치 어레이는 충분한 전압 안정성을 확보하기 위하여 내전압 1.2 KV인 IGBT를 40개 직렬 연결하여 사용하였으며 자기펄스 압축회로는 펄스 압축율 30을 목표로 설계하였다. 표 1은 IGBT 스위치 어레이에 사용된 IGBT의

* 正 會 員 : 韓 國 原 子 力 研 究 所 先 任 研 究 員

** 正 會 員 : 韓 國 原 子 力 研 究 所 責 任 研 究 員

*** 正 會 員 : 韓 國 原 子 力 研 究 所 責 任 研 究 員

§ 正 會 員 : 忠 南 大 學 電 氣 工 學 科 教 授

接 受 日 字 : 2004 年 4 月 8 日

最 終 完 了 : 2004 年 6 月 3 日

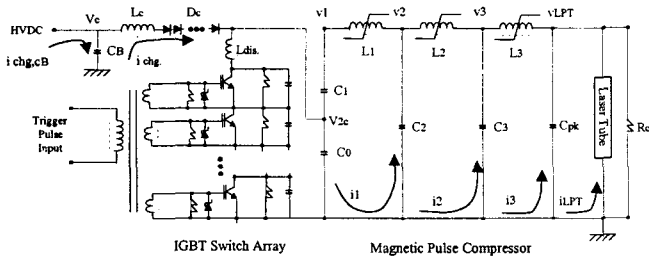


그림 1 제작된 펄스 전원의 구성도
Fig. 1 The circuit diagram of the pulse power supply

주요 전기적 특성표이며 표 2는 IGBT 스위치 어레이를 구성하는 소자들의 주요 특성표이다. 표 2에서 스너버 저항 및 스너버 커패시터의 크기는 (1)식 및 (2)식으로부터 결정하였다[13].

$$R \leq \frac{nV_D - V_S}{(n-1)I_{bmax}} \quad [\Omega] \quad (1)$$

- (1)식에서, R : 스너버 저항 값
n : 직렬연결한 IGBT 갯수
V_D : IGBT 1개의 최대 사용 전압
V_S : IGBT 스위치 어레이 사용 전압
I_{bmax} : 사용된 개별 IGBT의 최대 누설 전류

이다.

$$C \geq \frac{(n-1)Q_{MAX}}{nV_D - V_S} \quad [F] \quad (2)$$

- (2)식에서, C : 스너버 커패시턴스
n : 직렬 연결된 IGBT 갯수
Q_{MAX} : 사용된 개별 IGBT의 최대 역방향 회복전하
V_D : 개별 IGBT의 최대 사용 전압
V_S : IGBT 스위치 어레이 사용 전압

이다.

표 1 1.2 kV급 IGBT 특성

Table 1 The characteristics of the 1.2 kV IGBT

컬렉터-에미터 전압	1.2 kV
게이터-에미터 전압	±20 V
컬렉터 연속전류	50 A
컬렉터 펄스 전류	100 A
컬렉터 개방 때의 전류	≤ 1 mA
입력 커패시턴스	≤ 7.5 nF
통전시간 (turn-on time)	≤ 280 nsec
개방시간 (turn-off time)	≤ 480 nsec
역회복 전하	0.28 μC
모델명	CM50DU-24H

IGBT 스위치 어레이에서 스위칭된 펄스를 압축시키기 위하여 가포화 인덕터 (saturable inductor)와 커패시터 쌍으로 이루어진 펄스 압축단이 3개로 구성된 3단 자기펄스압축 회로를 제작하였다. 자기펄스압축단에 사용된 커패시터의 용량은 (3)식에 의해 계산되었으며 가포화 인덕터용 자심 (core)의 부피와 권선수는 (4)식과 (5)식에 의해 계산되었다 [14,15,16].

표 2 IGBT 스위치 어레이의 구성요소 정격

Table 2 The design parameters of the IGBT switch array

사용된 IGBT 개수	40 개
사용된 개별 IGBT 최대사용전압	1.2 kV
IGBT 스위치 어레이 사용전압	30 kV
개별 IGBT 개방최대전류	1 mA
최대 역방향 회복전하	0.28 μC
스너버 저항	360 kΩ
스너버 저항 손실	62.5 W
스너버 커패시턴스 (계산)	610 pF 이상
스너버 커패시턴스 (적용)	1000 pF
스너버 커패시턴스 손실	11.3 mJ/pulse

$$C = \frac{2P}{V^2 PRR} \quad (3)$$

- (3)식에서, C : 커패시터 용량
P : 펄스 전원에 투입되는 전력
V : 커패시터 C의 충전 전압
PRR : 펄스 반복율 (pulse repetition rate)

이다.

$$Volume_{core} = \frac{energy \cdot gain^2 \cdot \pi^2 \cdot \mu_0 \cdot (\mu_s \cdot P_f + 1 - P_f)}{4 \cdot (\Delta B_n)^2 \cdot P_f} \quad (4)$$

- (4)식에서, Volume_{core} : 가포화 인덕터 자심의 부피
energy : 펄스 1개의 에너지
gain : 전류 증폭율 또는 펄스 압축율
μ₀ : 진공에 대한 투자율 (4π x 10⁻⁷)
μ_s : 자심의 포화 비투자율 (≈ 2)
P_f : 패킹 팩터 (≈ 0.8)
ΔB_n : n번째 자심 자속밀도 변화량 (≈ 0.55T)

이다.

$$N_n = \frac{V_n \cdot \tau_{L_n}^{(s)}}{2 \cdot \Delta B_n \cdot A_{mn}} \quad (5)$$

- (5)식에서, N_n : n번째 압축단의 가포화 인덕터 권선 수
V_n : n번째 가포화 인덕터에 인가되는 전압
τ_{L_n}^(s) : n번째 가포화 인덕터에 인가되는 전압이 최대로 상승할때까지 소요되는 시간
ΔB_n : n번째 자심 자속밀도 변화량 (≈ 0.55T)
A_{mn} : n번째 자심의 단면적

이다.

표 3은 (3)식, (4)식, (5)식을 이용하여 계산한 자기펄스 압축회로를 구성하는 소자 및 펄스 전원 장치 주요 부품들의 특성표이다.

표 3 펄스 전원장치 구성 요소의 정격

Table 3 The design parameters of the pulse power supply

심벌	구성요소이름	정격	비고
HV DC	직류고전압전원	10 kV, 1 A MAX.	
C _B	커패시터 뱅크	0.1 μF, 20 kV	
L _c	충전용 인덕터	TDK PE38 toroidal cores, OD104xID80xt20, 170 turns, 5개	
D _c	충전용 다이오드	IXYS DSEI60-12A 40개	
L _{dis}	방전용 인덕터	260 μH	
C ₀ , C ₁	MPC 첫 번째단 커패시터	2 nF, 40 kV, each	
C ₂	MPC 두 번째단 커패시터	1 nF, 50 kV	
C ₃	MPC 세 번째단 커패시터	1 nF, 50 kV	
C _{pk}	피킹 커패시터	1 nF, 50 kV	
L ₁	MPC 첫 번째단 가포화 인덕터	Ni-Zn toroidal cores OD127 x ID81 x t12, 3개 90 Turns	
L ₂	MPC 두 번째단 가포화 인덕터	Ni-Zn toroidal cores OD127 x ID81 x t12, 2개 32 Turns	
L ₃	MPC 세 번째단 가포화 인덕터	Ni-Zn toroidal cores OD127 x ID81 x t12, 2개 11 Turns	
R _c	충전용 저항	50 ohm, 300 W	
Laser Tube	레이저 플라즈마 튜브	GL-202M LPT	

3. 특성 및 고찰

제작된 펄스 전원의 전압 및 전류 특성은 그림 2, 그림 3과 같다. 그림 2의 전압 파형은 고전압 탐침 (Tektronix model P6015) 및 오실로스코프 (Tektronix model DSA602A)를 사용하여 측정하였고 전류 파형은 전류 모니터 (Pearson model 411) 및 오실로스코프 (Tektronix model DSA602A)를 사용하여 측정하였다.

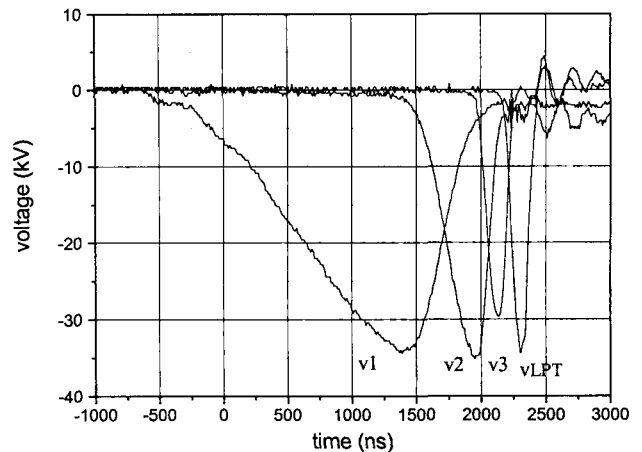


그림 2 펄스 전원의 전압 특성
Fig. 2 The voltage characteristics of the pulse power supply

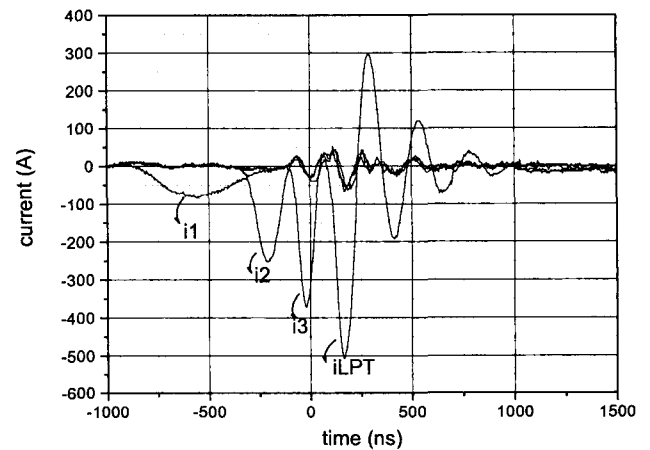


그림 3 펄스 전원의 전류 특성
Fig. 3 The current characteristics of the pulse power supply

그림 2에서 전압 V₁은 최대 진폭 34 kV이며 상승시간은 2 μs 이다. 이 2 μs의 시간은 IGBT 스위치 어레이가 통전하는 시간과 같다. IGBT 스위치 어레이가 통전하기 시작하여 2 μs가 경과하면 V₁의 전압은 최대값이 된다. 그 순간 가포화 인덕터 L₁이 포화되어 임피던스가 급격히 줄어들고 따라서 C₁, C₀ 양단에 충전된 전하는 C₂로 이동하여 V₂의 전압이 급격히 상승하기 시작한다. V₂의 진폭이 최대값에 도달할 때까지 소요되는 시간은 전류 i₁이 통전되는 시간과 동일하며 그 시간은 그림 2, 그림 3에서 500 ns 임을 알 수 있다. 따라서 IGBT 스위치 어레이가 통전되는 시간이 2 μs 이므로 전류 i₁의 펄스 폭은 4배 압축되었음을 알 수 있다. 같은 방법으로 전류가 자기펄스 압축단을 진행함에 따라 펄스폭은 점점 더 줄어들어 레이저 방전관에 인가되는 펄스 전압의 상승률은 80 ns로 줄어들고 이와 동시에 전류의 진폭은 점점 더 증가되어 레이저 방전관을 흐르는 전류의 최대값은 500 A로 증가된다. 그림 4는 제작된 펄스 전원의 모습이며 그림 5는 제작된 펄스 전원에 의하여 레이저 방전관이 레이저 발진되는 모습이다.

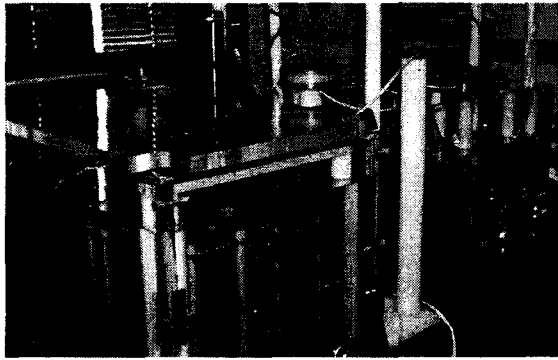


그림 4 제작된 펄스 전원의 모습
Fig. 4 A photograph of the pulse power supply



그림 5 제작된 펄스 전원을 사용한 레이저 발진 모습
Fig. 5 A photograph of laser oscillating with the pulse power supply

4. 결 론

다수의 IGBT를 직렬연결한 IGBT 스위치 어레이와 자기 펄스압축 (magnetic pulse compression) 회로를 사용하여 금속증기 레이저용 펄스 전원을 설계, 제작하고 그 특성을 조사하였다. 제작된 펄스 전원은 방전거리 0.5 m, 내경 10 mm인 레이저 방전관을 부하로 사용했을 때 펄스 반복을 5 kHz에서 최대 출력전압 34 kV, 출력 전류 500 A, 출력 전압 상승률 80 ns의 특성을 보였으며 장시간에 걸친 시험 운전을 통하여 안정성을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] B.E. Warner, P.D. Weber, "High-power copper vapor lasers and their application to precision drilling and cutting", Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, 1993. LEOS '93 Conference Proceedings. IEEE, Pages: 782-783, 1993.
[2] Y. Sano, N. Mukai, N. Aoki, C. Konagai, "Laser processing to improve residual surface stress of metal components", Advanced Applications of Lasers in

Materials Processing/Broadband Optical Networks/Smart Pixels/Optical MEMs and Their Applications. IEEE/LEOS 1996 Summer Topical Meetings: , Pages: 30-31, 1996.

[3] N.A. Lyabin, et al., "Development of industrial copper vapor lasers and their applications in techniques", International Conference on Lasers Proceedings, pages: 359-366, 1997.
[4] R. Farlow, et al., "Micromachining of a piezocomposite transducer using a copper vapor laser", Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on, Volume: 48 Issue: 3 , Pages: 639-640, May 2001.
[5] Varian Eimac, "EIMAC power grid tubes and accessories", Quick Reference Catalog 489.
[6] English Electric Valve Co., "EEV/M-OV Electron Tubes", Product Data.
[7] B.T. Merritt, G.R. Dreifuerst, "Development and operation of a solid-state switch for thyratron replacement", Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-JC-105355, 1991.
[8] Boris Yen, et al., "A high power linear solid state pulser", proceedings of the 1999 particle accelerator conference, New York, pages 1506-1508, 1999.
[9] J. Sigg, et al., "The Series Connection of IGBTs Investigated by Experiments and Simulation", IEEE power electronics specialist conference Vol. 2, pages 1760-1765, 1996.
[10] G. Botto, et al., "Series connected soft switched IGBT's for high power, high voltage drives applications: Experimental results", IEEE power electronics specialist conference Vol. 1, pages 3-7, 1997.
[11] Eupec GmbH+Co., "IGBT Application Notes", 1995.
[12] Mitsubishi Data Sheet (IGBT & Hybrid IC), 1998.
[13] B.W. Williams, "Power Electronics", John Wiley & Sons, pp.187-194, 1987.
[14] D. L. Birx, et al., "Basic principles governing the design of magnetic switches", Lawrence Livermore National Laboratory, UCID 18831, 1980.
[15] H.C. Kirbie, "Magnetic switching", Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-100910, 1989.
[16] M.H. Cho et al., "Development of 2-stage magnetic pulse compression modulator", J. Accel. Plasma Res., Vol. 1, No. 2, 58-65, 1996.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행한 2004년도 원자력연구개발사업과제의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

저 자 소 개



진 정 태(陳 瑗 泰)

1961년 2월 15일 생. 1986년 경북대 전자공학과 졸업. 2000년 충남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국원자력연구소 양자광학기술개발부 선임연구원.



김 철 중(金 哲 中)

1951년 11월 16일 생. 1974년 서울대학교 졸업. 1982년 University of Arizona 졸업(박사). 현재 한국원자력연구소 양자광학 기술개발부 책임연구원.



차 병 현(車 秉 憲)

1957년 8월 18일 생. 1981년 경북대 물리학과 졸업. 1983년 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 1988년 동 대학원 물리학과 졸업(박사). 현재 한국원자력연구소 양자광학기술 개발부 책임연구원.



이 흥 호(李 興 浩)

1950년 10월 28일 생. 1973년 서울대 공업교육과(전기전공) 졸업. 1977년 동 대학원 공업교육과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 컴퓨터공학과 졸업(박사). 현재 충남대학교 전기공학과 교수.