

반도체 스위치형의 고전압 펄스 전원장치

김광훈, 이홍식, D. Sytykh, 임근희
한국전기연구원 전기물리연구그룹

A solid-state switch based high-voltage pulsed power supply

Guang-Hoon Kim, Hong-Sik Lee, D. Sytykh, Geun-Hie Rim
Applied Electrophysics Research Group, KERI, Korea

Abstract - This paper describes an all solid-state switch pulse generator for various applications where square pulse voltage is required. The pulse generator produces various voltage pulses: voltage 5~100kV, current 10~200A, pulse width 1~10 μ sec, repetition rate up to 500Hz. The output power is the combination of these parameters up to 10kW. It consists of a DC-DC converter and several pulse generating modules which are connected in series to obtain higher pulse voltage. Each module contains semiconductor switches (IGBT's), energy storage capacitors and control units to trigger switches. The structure and operational principle are described and the protection circuit for reliable operation is suggested. Experimental results show that the pulse generator can be used for applications with nonlinear loads.

1. 서 론

고에너지 물리, 이온주입, 플라즈마 처리공정 등의 많은 응용분야에서 부하 특성이 비선형적으로 변하더라도 원만하게 적용할 수 있는 고전압 구형과 전원장치가 필요하다. 식품 살균, 쓰레기 처리, 오염 방지, 의료 응용 등 새로이 개발되는 응용 분야에서도 고전압 펄스 전원장치가 요구된다. 펄스 파워 기술은 펄스 변조를 위한 스위치 개발과 밀접한 관련이 있다. 이상적인 변조기는 전원과 부하 사이에서 스위치같은 역할을 한다. 이상적인 스위치는 아주 높은 전압에 견딜 수 있어야 하고, off일 때 무한대의 저항을/on일 때 제로의 저항을 갖으며 과도현상 및 전압역전으로부터 자유로워야 한다. 그리고 또한 이상적인 스위치는 순간적으로 매우 짧은 on/off 시간을 갖고 부하 전류 및 반복율에 무관하게 구형파의 펄스를 만들 수 있어야 한다. 지금까지는 진공관 스위치나 싸이라트론 등을 사용하거나, 이들을 magnetic pulse compression (MPC), pulse forming network (PFN) 또는 2차 변압기 등으로 펄스를 변화시켜 대출력 펄스를 만들었다. 그러나 PFN의 출력 전압 파형은 부하에 따라 변하고 MPC 출력은 1차 전압에 따라 변하므로 임피던스가 일정하지 않은 비선형 부하에 적용하는 데는 문제점이 있고 펄스폭을 변화시키는 것 또한 어렵다. 또한 기존의 스위치들의 수명이 지극히 한정적이어서 산업응용에 중요한 걸림돌이 된다. 그리고 기존의 방법들은 높은 전압강하, 제한된 전류 통전 능력 등을 보여 주었고 복잡한 형태의 구동/보호 회로 등으로 인하여 유지비가 많이 들었다. 그럼에도 불구하고 보다 나은 대안이 없었기 때문에 고전압 스위칭 문제를 해결하는 방법으로 이들을 사용하여 왔다.

최근 들어 반도체 스위치의 제작 기술이 급속히 발달함에 따라 반도체 스위치를 이용한 고전압 펄스 전원 장

치의 개발이 활발히 진행되고 있다. 고체형 소자들은 일반적으로 저전압 소자이지만 최근 들어 IGBT 소자의 전압/전류 정력이 급속히 향상되고 있다. 대표적으로 IGBT 소자의 정격 전압은 1200~3300V이고 통전 전류는 50A ~1200A 수준이다. 이러한 IGBT 소자들을 고전압 스위칭에 사용하려면 많은 수의 소자를 직렬로 연결하여야 한다. 모듈 개념을 사용하면 필요한 출력 전압에 능동적으로 대처할 수 있다. 단, 부하가 소자들 전체에 고르게 배분되어서 몇몇 소자에만 부하가 집중되지 않도록 주의해야 한다.

우리는 반도체 스위치를 사용하여 고전압 구형과 펄스를 출력하고 변수들을 넓은 범위에서 가변 할 수 있는 Universal pulsed power supply를 제작하고자 하는데 그 사양은 다음과 같다: 펄스 전압 5~100kV, 펄스 전류 10~200A, 펄스폭 1~10 μ sec, 반복율 single ~ 500Hz. 평균 출력은 위 변수들의 조합으로 결정되는데 본 펄스 발생기는 10kW이다.

본 논문에서는 IGBT 스위치를 이용하여 제작중인 고전압 펄스 전원장치의 작동 원리와 구조에 대하여 살펴보고 안정적인 작동을 위한 구동 드라이버와 보호회로에 대하여 언급하고자 한다. 그리고 펄스 발생기를 플라즈마 부하에 적용하여 테스트한 결과에 대하여 논의하고자 한다.

2. 본 론

2.1 구동 원리

저전압 스위치를 사용하여 고전압 펄스 발생기를 제작하는 데는 여러 가지 방법이 있다. 그 중에서 많이 사용되는 것이 병렬 충전과 직렬 방전의 형식을 이용한 Marks generator 구조이다. 그림 1은 펄스 발생기의 블록 다이어그램을 나타낸 것이다. 입력 전원은 3상 380VAC이다. DC-DC converter를 이용하여 1차 전압을 20kHz 고주파 전압으로 만들어 펄스 발생 모듈 (pulse generating module: PGM)에 보낸다. 각각의 펄스 발생 모듈은 에너지 저장 커패시터, 스위치 및 구동 드라이버 등으로 구성되어 있어 main controller로

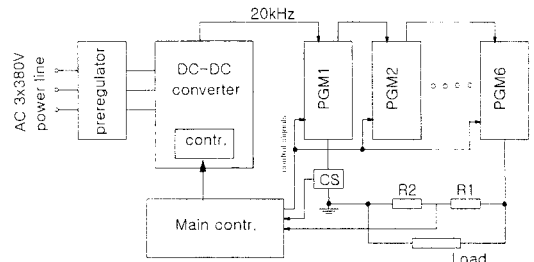


그림 1. 펄스 발생기의 블록 다이어그램

스위치를 작동시켜 고전압 펄스를 발생시킨다. 전력 입력단에 AC preregulator로 넣어서 DC-DC converter의 1차 전압을 조절하였다. converter의 콘트롤러에는 driving oscillator, soft start unit, 출력 전류와 출력 파워를 제한하는 protection unit 등이 있다. 출력은 부하에 연결되고 측정된 전압과 전류 신호는 main controller로 보내진다.

본 연구에서 제작한 펄스 발생 모듈의 정격은 20kV, 200A이고 그 개념은 그림 2와 같다. 전체 펄스 발생기는 6개의 펄스 발생 모듈로 구성되어 있다. 각각의 모듈에는 변압기, 정류기(D1), 에너지 저장 커패시터(C), IGBT 스위치(S), bypass diode(D2), 그리고 스위치들을 트리거시키기 위한 드라이버 등으로 구성되어 있다. 각 모듈에는 1200V-200A IGBT 스위치 20개가 (dual-type으로 10개의 IGBT가) 있고 펄스 발생기 전체적으로 120개의 스위치를 사용하였다. 펄스 모듈의 구동은 그림 2에 나타난 바와 같이 에너지를 저장하는 충전 모드 (a)와 펄스를 발생시키는 방전 모드 (b)로 나눌 수 있다. 그림 2(a)와 같이 스위치가 off일 때는 정류회로를 통하여 커패시터에 에너지가 저장된다. 그리고 스위치가 on이 되면 그림 2(b)와 같이 on된 스위치에 연결된 저장 커패시터들은 직렬로 연결되어 방전을 시작한다. 출력 전압은 커패시터에 충전된 전압과 on된 스위치들의 수에 의하여 결정된다. 일부 on되지 않은 스위치에서는 커패시터에 저장된 에너지가 방전되지 않고 정류기 bypass diode를 통하여 흐른다. 부하와 병렬로 연결된 저항은 pull-down resistor로서 스위치가 off될 때 부하와 출력 케이블에 있는 커패시터의 방전경로가 되어서 펄스의 하강시간을 짧게하여 스위치의 dynamic loss를 줄일 수 있다. 그리고 pull-down resistor는 펄스 출력 전압을 측정하기 위한 내부 분압기로도 사용하였다.

스위치들의 제어를 간단히 하기 위하여 전체 스위치들을 5개 단위로, 즉, 한 모듈의 스위치들을 4개의 그룹으로 나누었다. 따라서, 커패시터에 1kV가 충전되어 있으면 펄스 출력 전압을 5kV 단위로 조절할 수 있다. 각각의 그룹들은 광섬유 라인을 통하여 각각의 스위치와 연결된 드라이버에 콘트롤 신호가 전하여 그룹들을 독립적으로 트리거시킨다. 따라서 출력 펄스의 전압 크기는 두 가지 방법으로 조절할 수 있다: 하나는 트리거 신호의 제어로 on되는 스위치 그룹의 수를 조절하는 것이고 다른 하나는 DC converter의 1차 전압을 preregulator로 조절하여 커패시터의 충전 전압을 조절하는 것이다.

2.2 스위치 특성 비교

IGBT의 스위칭 특성은 본 펄스 발생기에서 나오는 펄스의 상승/하강 시간과 관계되고 파워 손실은 발생기

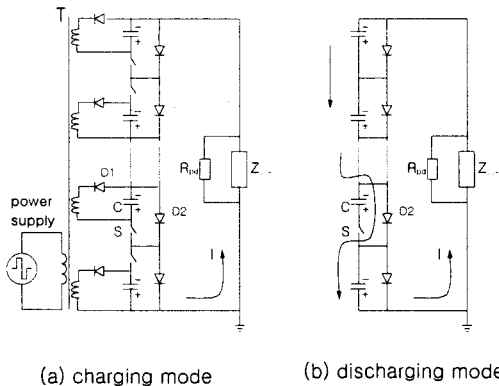


그림 2 펄스 발생 원리의 개략도

표 1 Eupec사의 IGBT 특성 비교
(펄스폭 5μsec, 반복율 500Hz)

parameter \ type	BSM200 GB120DLC	BSM200 GB120DN2
I_{CES} [mA]	0.8	12
$V_{CE,sat}$ [V]	2.4	3.1
t_r [ns]	70	80
t_f [ns]	50	80
E_{on} [mJ]	22	30
E_{off} [mJ]	23	23
Static loss[W]	on	1440
	off	185
dynamic loss [W]	2700	3200

의 효율에 큰 영향을 미치는 등 발생기의 특성을 결정짓는 중요한 요소이다. 스위치에서 발생하는 파워 손실을 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 스위치가 on 또는 off 되어 있을 때 발생하는 static loss이고 다른 하나는 스위치가 on/off될 때 발생하는 dynamic loss이다. 펄스폭이 아주 짧고 반복율이 높지 않을 경우에 (duty < 10%) 스위치가 on되는 동안의 시간은 off되어 있는 시간에 비하여 무시될 수 있으므로 static loss의 대부분은 스위치가 off되어 있는 충전 모드에서 발생한다. 따라서 static loss는 스위치에 인가된 전압 (저장 커패시터의 충전 전압)과 IGBT의 leakage current에 의하여 결정된다. 본 펄스 발생기에서는 low loss type으로 Eupec사의 모델 BSM200GB120DLC type의 IGBT를 사용하였다. 최대 leakage current는 0.8mA로서 스위치 하나의 파워 손실은 평균 0.8W이고 120개의 스위치 전에에서 발생하는 파워 손실은 96W이다. 참고로, 같은 조건에서 BSM200GB120DN2 type은 최대 leakage current가 12mA로서 스위치 하나의 파워 손실은 12W이고 전체의 파워 손실은 1,440W로서 DLC type에 비하여 15배나 된다. Off일 때 static loss는 스위치의 saturation voltage에 의하여 결정된다. 전류가 200A, 펄스폭 5μsec일 때 에너지 손실은 DLC type의 경우에 2.4mJ이고 DN2 type의 경우에 3.1mJ이 된다. 따라서, 펄스 반복율 500Hz일 때 전체 파워 손실은 각각 145W, 185W가 된다.

그리고 다른 손실 요인은 스위치가 on 또는 off될 때 발생하는 dynamic loss이다. DLC type의 경우에 스위치 1개당 에너지 손실은 45mJ로서 반복율 500Hz로 펄스 발생기를 동작하면 전체의 손실은 2700W가 된다. 이에 비하여 DN2 type의 경우에는 스위치 1개당 에너지 손실이 53mJ로서 같은 조건에서 전체 손실은 3200W가 된다. 따라서 BSM200GB120DLC type은 BSM200GB120DN2 type 보다 저손실의 IGBT로서 본 펄스 발생기의 제작에 훨씬 유리하고 low-loss type의 스위치를 사용하는 것이 매우 중요함을 알 수 있다. 도표 1은 위에서 언급한 IGBT의 특성을 정리 비교한 것이다.

2.3 보호회로

고체형 반도체 스위치 만을 사용하여 제작된 본 펄스 발생기는 부하의 short circuit을 포함한 모든 가능한 종류의 부하 조건으로부터 보호되고 안정적으로 동작하여야 함은 매우 중요하다. 따라서 각각의 IGBT 스위치들은 부하에서 short circuit이 발생할 때 통전 전류를 약 500A에서 제한하는 self protection unit을 갖추었다. short circuit이 발생하면 main controller의 over load protection unit에서 이를 판단하고 스위치의 드라이버에 보내는 콘트롤 신호의 전송을 차단한다.

또한 RCD snubber 회로를 이용하여 voltage spike로부터 스위치들을 보호하였다. 그리고 전체 전압이 스위치들에 고르게 배분되도록 스위치에 저항을 병렬로 연결하였다.

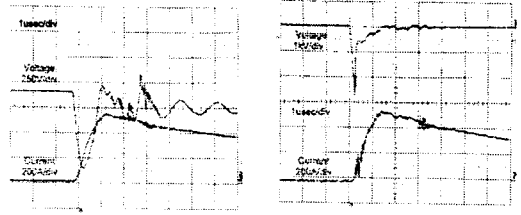
2.4 펄스 발생기의 구성

과워 변압기는 converter 또는 이전 모듈로부터 과워를 받고 다음 모듈로 과워를 전달하는 변압기이다. 2차 권선은 다음 모듈로 과워를 전달하는 권선, 커패시터에 에너지를 저장하는 권선과 드라이버 전원을 위한 권선 등으로 구성되어 있다. 충전 커패시터(C)는 474K 1250V를 13개 병렬로 연결하여 커패시턴스는 6.2 μ F이다. 그리고 bypass diode(D2)는 빠른 회복시간 $t_{rr}=40\text{ns}$ 를 갖는 IXYS사의 DSEI 120을 사용하였다. 그리고 드라이버에 콘트롤 신호를 전달하기 위하여 광섬유 라인을 사용하였다. 출력은 6개의 펄스 발생 모듈들이 전기적으로 서로서로 직렬로 연결되어 펄스 발생기를 구성한다. 여기서 주목할 것은 과워 변압기가 각 모듈마다 직렬로 연결되어 있어서 각각의 과워 변압기와 모듈은 단지 20kV의 절연 내력만 있으면 된다는 것이다. 단점은 각 모듈의 과워는 이전 모듈에서 소모되므로 후에 전송되므로 각 모듈에서 저장 커패시터의 충전 전압은 이전 모듈의 충전 전압보다 낮아진다. 이를 해석적으로 알아보았는데 첫 번째 모듈과 마지막 (6번째) 모듈의 충전 전압 차이는 펄스 발생기에 최대의 부하가 걸렸을 때 약 10% 정도였다. 그리고 펄스 발생기 내부의 스트레이 인덕턴스를 최소화 하기 위하여 모듈들을 연결하는 과워 라인들과 접지 라인의 내면적을 최소로 유지하도록 배선하였다.

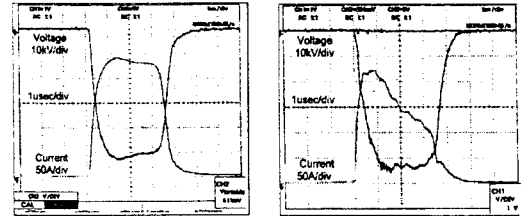
2.5 실험 결과

먼저, 각 모듈의 self-protection unit이 제대로 작동하는지 확인하였다. 제작된 각각의 발생 모듈들을 short circuit와 spark gap breakdown 조건에서 테스트하였다. 그림 3(a)은 short circuit 조건에서 스위치에 걸리는 전압과 부하에 흐르는 전류 파형을 보여준다. Short circuit이 되더라도 전류는 500A이하로 제한됨을 알 수 있다. 그리고 spark voltage는 그다지 크지 않고 어느 경우에서나 약 4 μsec 이내에 제어되었다. 그림 3(b)은 spark gap breakdown 조건에서 부하에 걸리는 전압과 전류 파형을 보여준다. 전압이 약 3kV까지 올라가더라도 전류는 500A이하로 제한됨을 알 수 있다. 따라서 protection unit이 잘 작동함을 알 수 있다.

제작된 6개의 펄스 발생 모듈을 스택에 장착하고 전기적으로 연결한 후에 인덕턴스가 없는 저항 부하와 비선형적인 특성을 갖는 플라즈마 부하에서 각각 테스트하였다. 그림 4(a)는 저항부하 ($R=230\Omega$)에 걸리는 전압과 전류 파형을 보여준다. 출력 전압은 50kV이고 전류는 250A으로 펄스폭은 약 3.5 μsec 이다. 펄스의 상승/하강시간이 1 μsec 이내로 매우 짧은 구형파임을 알 수 있다. 그리고 그림 4(b)는 플라즈마 부하에 (플라즈마 소스 이온주입 장치) 걸리는 전압과 전류 파형이다. 전압은 구형파 특성을 나타내는데 전류는 플라즈마 이온주입의 전류 특성에 의하여 초기에는 큰 전류가 흐르다가 전류가 줄어든다. 이는 비선형적인 부하에서도 제작된 펄스 발생기는 구형파 형태의 전압 펄스를 안정적으로 출력할 수 있음을 보여준다. 제작된 펄스 발생기를 아직 절연유로 절연 시키지 않았기 때문에 여기에서 보여준 결과들의 최대 출력전압은 50kV정도이다. 본 펄스 발생기가 안정적으로 작동함을 확인한 후에 절연유를 넣고 100kV정도의 높은 전압에서 테스트할 예정이다.



(a) short circuit test (b) spark gap test
그림 3. protection unit의 테스트 결과



(a) 저항부하 (b) 플라즈마 부하
그림 4 부하 테스트 결과

3. 결 론

본 논문에서 구형파를 형태의 모양을 갖는 고전압 펄스 발생기를 제작하기 위한 all-solid state modulator의 동작 원리와 구조에 대하여 살펴보았다. 본 연구를 통하여 펄스 전압, 펄스 전류, 펄스 폭, 반복율 등의 여러 변수들을 넓은 범위에서 가변할 수 있는 universal pulse power supply를 제작하고자 한다. protection circuit에 대하여 소개하고 실험을 통하여 이를 확인하였다. 제작된 펄스 발생기는 저항 부하와 비선형 부하에 대하여 우수한 동작특성을 보임을 알았다. 펄스 발생기의 출력 효율을 개선하기 위한 연구를 계속하고자 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] Marcel P. J. Gaudreau, P. E. Jeffrey, A. Casey, and M. A. Kempkes, "Solid-state modulators for plasma immersion ion implantation application", J. Vac. Sci. Technol. B17, 888 (1999).
- [2] K. Okamura, H. Shimamura, N. Kobayashi, K. W. Watababe, "Development of a semiconductor switch for high power copper vapor lasers", Int. Pulsed Power Conf -1997, 975 (1997).
- [3] Patent pending.