

# 빠른 상승 시간을 갖는 파워 셀 기반 펄스 파워 모듈레이터

이승희<sup>1</sup>, 송승호<sup>1</sup>, 류홍제<sup>†</sup>

## Power Cell-based Pulsed Power Modulator with Fast Rise Times

Seung-Hee Lee<sup>1</sup>, Seung-Ho Song<sup>1</sup>, and Hong-Je Ryoo<sup>†</sup>

### Abstract

This paper describes the design of a power cell-based pulsed power modulator with fast rise times. The pulse-generating section of the pulse power modulator is a series stack of power cells. Each power cell is composed of a storage capacitor, a pulse switch, and a bypass diode. When the pulse switches are turned on, the capacitors are connected in series and the sum of voltages is applied to the load. For output pulses with fast rise times, an IGBT with fast turn-on characteristics is adopted as a pulse switch and the optimized gate driving method is used. Pspice simulation is performed to account for the gate driving method. A 10 kV, 12-power cell-based pulsed power modulator is tested under resistive load and plasma reactor load. The rise times of output pulses less than 20 ns are confirmed, showing that the pulsed power modulator can be effectively applied to pulsed power applications with fast rise times.

**Key words:** Pulsed power modulator, High voltage, Fast rise time

### 1. 서 론

친환경, 의료, 군사 산업을 포함한 다양한 응용 분야에 사용되는 펄스 파워 모듈레이터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 펄스 응용 분야마다 요구하는 펄스 파워 모듈레이터의 사양이 다르다. 특히 가스 처리 시스템 및 수 처리 시스템과 같은 환경 응용 분야에서는 빠른 상승 시간을 가진 펄스를 생성할 수 있는 펄스 파워 모듈레이터를 요구하며, 관련 연구가 수행되고 있다<sup>[1]-[7]</sup>. [1]-[6]에선 반도체 스위치를 사용하여 펄스를 발생시키고 MPC(Magnetic Pulse Compression), PFN(Pulse Forming Network), spark gap을 연계하여 펄스 상승률을 높이는 혼합 구조들이 제안되었다. 하지만 MPC, spark gap의 낮은 효율과 발열로 전원 장치의 냉각에 대한 고려가 필요하며, 사이즈 및 반복률의 제약이 발생

한다<sup>[1]-[4]</sup>. 또한, MPC와 PFN 사용에 따른 임피던스 매칭 설계가 요구되며 출력 펄스의 자유로운 조절이 어렵다<sup>[3]-[6]</sup>. 이에 따라 여러 한계를 갖고 있는 MPC, PFN, spark gap의 연계 없이 순수 반도체 스위치 기반으로 수십 ns의 상승 시간을 구현하는 시도들이 진행되고 있다<sup>[7]</sup>. 순수 반도체 스위치 기반의 펄스 파워 모듈레이터는 MPC, PFN, spark gap과 같은 장치로 인한 추가적인 제약 없이 순수 반도체 기반 구조의 높은 반복률, 긴 수명, 높은 효율, 쉬운 펄스 제어의 이점을 모두 갖기 때문에 응용분야에 더욱 효과적으로 적용될 수 있다.

다양한 구조의 순수 반도체 기반 장치 중 펄스 스위치, 스토리지 커패시터, 바이패스 다이오드로 이루어진 단일 파워 셀이 직렬 스택 되어있는 펄스 출력부 구조를 가지는 파워 셀 기반 펄스 파워 모듈레이터는 다양한 장점들로 펄스 응용 분야에 널리 사용되고 있다<sup>[8]-[12]</sup>. 첫째, 펄스 스위치들의 턴 온 동작을 통해 스토리지 커패시터들이 직렬 연결되어 이들의 전압 합이 부하에 인가되는 방식의 펄스 출력부는 비교적 낮은 충전 전압으로도 고전압 출력이 가능하다. 둘째, 커패시터 충전부는 단일 컨버터와 다중 권선 변압기를 통해 추가적인 충전 스위치 없이 커패시터들을 동시에 충전할 수 있다. 셋째, 게이트 구동부는 단일 인버터와 고전압 캐이블로 구성된 특수한 구조로 펄스 스위치 드라이버들을 동시에 구동할 수 있어 다수의 펄스 스위치들의 게

Paper number: TKPE-2021-26-1-4

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

<sup>†</sup> Corresponding author: hjryoo@cau.ac.kr, Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University  
Tel: +82-02-820-5178 Fax: +82-02-3280-5867

<sup>1</sup> Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University

Manuscript received Sep. 21, 2020; revised Oct. 13, 2020; accepted Nov. 10, 2020

— 본 논문은 2020년 전력전자학술대회 우수추천논문임

— 본 논문은 2020년 전력전자학술대회 우수논문상 수상논문임

이트 제어를 효과적으로 수행한다.

파워 셀 기반 펄스 파워 모듈레이터 출력의 상승 시간을 결정하는 주요 요소는 펄스 스위치들의 동기화 및 펄스 스위치들의 스위칭 속도이다. 이에 20ns 이하의 빠른 상승 시간을 구현하기 위해선 빠른 턴 온 특성을 가진 펄스 스위치 선정과 정확한 동기화와 게이트 구동 속도를 만족시킬 수 있는 게이트 구동 회로가 필요하다.

본 논문은 빠른 상승 시간을 갖는 펄스 출력이 가능한 파워 셀 기반 펄스 파워 모듈레이터를 제안한다. 스위칭 특성, 신뢰성, 가격을 고려하여 펄스 스위치를 선정하였으며, 펄스 스위치들의 구동 속도를 극대화하기 위한 게이트 구동부 설계가 이루어졌다. 나노초 구동 설계가 적용된 펄스 파워 모듈레이터의 성능과 신뢰성을 검증하기 위해 10kV 급 프로토타입 테스트가 진행되었다. 게이트 구동부 동작 실험을 통해 인버터의 성능과 펄스 스위치들의 게이트 신호를 확인하였으며, 고전압 출력 실험에선 20ns 이하의 상승 시간 및 100ns의 펄스 폭을 갖는 10kV 펄스 출력을 확인하였다.

## 2. 파워 셀 기반 빠른 상승 시간을 갖는 펄스 파워 모듈레이터

### 2.1 파워 셀 기반 펄스 파워 모듈레이터의 구조와 동작 원리

파워 셀 기반 펄스 파워 모듈레이터는 펄스 출력부, 게이트 제어부, 커패시터 충전부로 구성되어 있으며, 전체 구조는 그림 1에 나와 있다.

커패시터 충전부는 LCC 공진형 컨버터, 다중 권선 변압기와 배전압 정류기를 통해 펄스 출력부의 다수의 스토리지 커패시터들을 동시에 충전한다. LCC 공진형 컨버터는 다중 권선 변압기의 높은 누설 인덕턴스와, 2 차 측 파워 셀이 스택 되어 있는 구조로 1 차 측에 반영되는 높은 기생 병렬 커패시턴스를 효과적으로 이용할 수 있다<sup>[11]</sup>. 또한, 공진 주파수 이상에서 ZVS를 만족하여 고주파 스위칭이 가능하고 전류원 특성을 가져 커패시터 단락 시에 컨버터가 보호된다.

펄스 출력부는 출력 전압을 높이기 위해 다수의 파워 셀이 직렬로 스택 되어있으며, 단일 파워 셀은 스토리지 커패시터, 펄스 스위치, 그리고 바이패스 다이오드로 구성되어 있다. 펄스 출력부는 펄스 스위치의 스위칭에 따라 그림 2(a)와 같이 커패시터들의 직렬연결로 고전압을 부하에 인가한다. 이때의 출력 전압은 단일 커패시터 충전 전압의 N 배이다. 한편, 펄스 스위치 소손과 게이트 드라이버 오동작 등에 의해 펄스 스위치의 동기화가 실패한 경우 그림 2(b)와 같이 펄스 전류가 바이패스 다이오드를 통해 우회된다. 이때의 출력 전압은 커패시터 충전 전압의 N-1 배이다. 바이패스 다이오드로 펄스 전류를 우회시키는 이러한 보호 동작은 고전압 출력을 위한 수많은 펄스 스위치들 중 일부에서의 오동작에도 회로

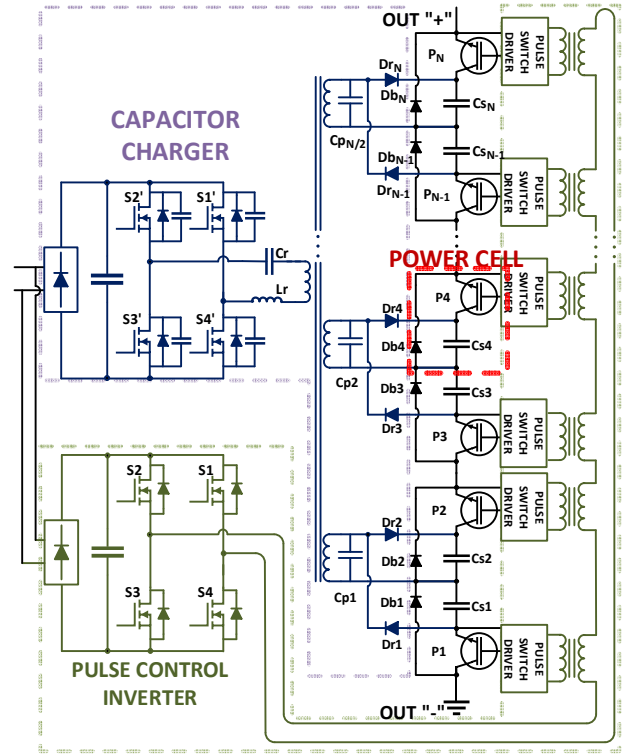


Fig. 1. Schematic of the fast rise time pulsed power modulator based on power cell.

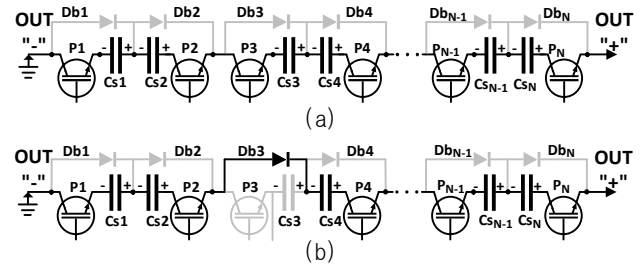


Fig. 2. Operational modes of power cell stack. (a) Normal operation mode, (b) Malfunctioning operation mode.

의 손상 없이 강인한 동작을 할 수 있게 하는 파워 셀 스택 구조의 특징이다.

게이트 구동부는 그림 1과 같이 펄스 컨트롤 인버터, 고전압 케이블, 펄스 스위치의 게이트 드라이버들로 이루어져 있다. 펄스 컨트롤 인버터는 ON 펄스와 OFF 펄스를 출력하며, 이 양극성 펄스는 고전압 케이블과 소형 변압기를 통해 펄스 스위치의 게이트 드라이버에 입력된다. 입력된 각 신호는 게이트 드라이버의 전압원 역할을 하는 커패시터를 충전함과 동시에 게이트 턴 온 동작과 게이트 턴 오프 동작을 시작하게 한다. 결과적으로 ON 펄스와 OFF 펄스에 게이트 드라이버가 구동되어 펄스 스위치의 게이트를 제어한다.

### 2.2 펄스 스위치 선정

펄스 스위치의 스위칭에 의해 펄스 파워 모듈레이터

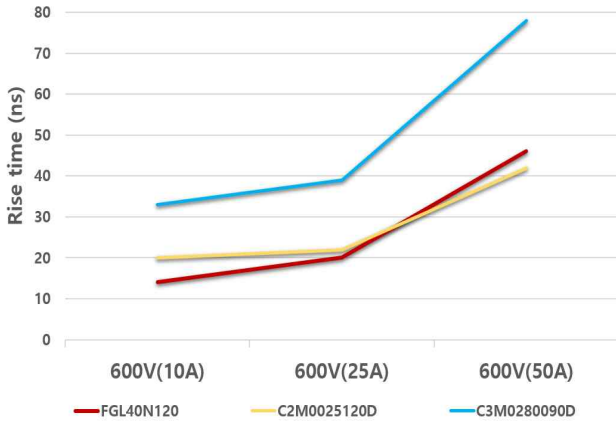


Fig. 3. The results of the single cell tests for rise time comparison.

의 펄스 출력이 발생하며 스위칭 속도는 펄스 출력의 상승 시간 및 펄스폭을 결정하는 중요한 요소이다. 빠른 상승 시간을 갖는 펄스 설계를 위해선 스위칭 특성을 고려한 펄스 스위치의 선정이 요구된다.

전력 반도체 스위치의 상승 시간을 비교하기 위해 턴 온 특성이 빠른 모델(FGL40N120AND, C2M0025120D, C3M0280090D)들을 선정하였으며, 600V(10A/25A/50A)에서 상승 시간을 측정 및 비교하였다. 상승 시간은 피크 펄스의 10%에서 90%까지 이르기까지 걸리는 시간으로 정하였다. 그림 3은 싱글셀 테스트 결과이다. 600V(10A/25A/50A) 조건에서 상승 시간은 FGL40N120AND(13ns/19ns/46ns), C2M0025120D(19ns/20ns/41ns), C3M0280090D(32ns/39ns/78ns)로 측정되었다.

한편, 펄스 파워 모듈레이터가 실제 펄스 응용 분야에 적용되기 위해선 높은 신뢰성과 합리적인 가격이 요구된다. FGL40N120AND는 정격 연속 도통 전류의 약 10배의 펄스 전류를 스위치 손상 없이 수백 나노 초 동안 도통시킬 수 있다는 사실이 실험적으로 증명되었고, 다양한 펄스 파워 모듈레이터에 사용되며 신뢰성을 입증하였다<sup>[12]</sup>. 한편, 고전압 펄스 파워 모듈레이터엔 일반적으로 수십 개 이상의 펄스 스위치가 사용되며 비교적 높은 가격의 SiC-MOSFET 기반의 장치는 상용화시키는 데에 어려움이 있다. 반면, IGBT(FGL40N120AND)의 낮은 가격은 파워 셀 스택 시의 비용을 크게 줄일 수 있다<sup>[9]</sup>.

빠른 상승 시간을 갖는 펄스 파워 모듈레이터의 펄스 스위치로 빠른 턴 온 특성, 고신뢰성, 낮은 가격과 같은 장점이 있는 1200V IGBT(FGL40N120AND)가 선정되었다.

### 2.3 펄스 스위치의 게이트 제어

펄스 스위치의 스위칭 특성과 마찬가지로 펄스 스위치의 게이트 구동 속도 또한 펄스 파워 모듈레이터의 출력 상승 시간에 큰 영향을 미친다. 빠른 상승 시간을 갖는 펄스를 출력하기 위해선 모든 펄스 스위치들에 정

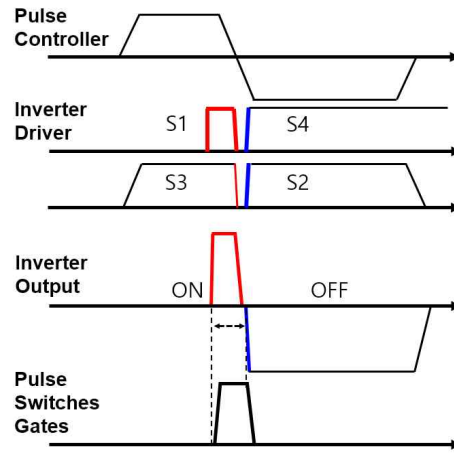


Fig. 4. Gate control scheme for pulse switches.

확히 동기화된 빠른 게이트 신호를 인가해야 한다.

나노초 펄스 컨트롤 인버터는 오른쪽 그림 4과 같은 빠른 상승 시간을 갖는 ON/OFF 펄스를 출력하여 펄스 스위치 게이트 드라이버들의 구동 속도와 동기화를 향상시킨다. ON 펄스는 게이트 드라이버들에 입력되어 게이트 턴 온 동작을 시작하는 트리거 신호가 된다. ON 펄스의 빠른 상승 시간은 트리거 속도를 높여 게이트 드라이버의 구동 속도를 높이고 게이트 드라이버들 간의 트리거 시점을 최소화하여 동기화 오차를 최소화한다. 또한, ON 펄스의 짧은 펄스폭은 펄스 스위치의 턴 온 시점과 턴 오프 시점 사이 구간을 최소화하여 짧은 펄스폭을 구현한다.

## 3. 펄스 스위치의 나노초 게이트 제어를 위한 펄스 컨트롤 인버터의 게이트 구동 방식

### 3.1 펄스 컨트롤 인버터

펄스 컨트롤 인버터를 구동하는 풀 브릿지 드라이버는 그림 1과 같이 펄스 컨트롤러의 출력과 절연 변압기를 통해 연결되어 있으며 변압기를 통해 입력된 펄스 컨트롤러의 출력에 의해 동작한다. 변압기를 사용한 방식은 간단한 구조로 절연된 신호를 만들어 낼 수 있다는 장점이 있지만, 변압기 기생 인덕턴스에 의해 신호의 슬루율이 낮아지고 신호의 폭이 증가하여 나노초 게이트 구동을 어렵게 한다.

펄스 컨트롤 인버터 스위치의 게이트 구동 속도는 인버터 출력 상승·하강 시간과 펄스폭을 결정하는 중요한 요소이다. 나노초 ON 펄스 및 빠르게 상승하는 OFF 펄스를 구현하기 위해 기생 인덕턴스를 극복하고 빠른 게이트 구동을 가능하게 하는 두 가지 방식이 적용되었다. 펄스 컨트롤 인버터 드라이버는 커패시터와 딜레이 회로를 사용하여 ON 펄스 출력 스위치에 빠른 상승·하강 시간과 짧은 펄스폭을 갖는 게이트 전압을 입력하였으며, 게이트 부스팅 회로를 사용하여 OFF 펄스 출력 스위치에 빠르게 상승하는 게이트 전압을 입력하였다.

그림 4와 같이 펄스 컨트롤 인버터는 샤프한 ON 펄스 출력을 위해 S1 및 S3의 게이트 신호가 일치하지 않는 비대칭 게이트 구동 방식을 사용하였다. 미리 S3을 턴 온 해놓고 S1을 순간적으로 턴 온·오프하여 인버터가 샤프한 펄스를 출력하도록 하였다. 이때, S3의 게이트 전압 상승 시간은 인버터 출력에 영향을 미치지 않기 때문에, S3 게이트 전압의 빠른 상승 시간 및 좁은 펄스폭을 위한 특수한 방식이 적용되지 않았다. 단순히 직렬 저항을 통해 턴 온 되고 풀다운 스위치에 의해 턴 오프 되는 구조가 사용되었다.

### 3.2 커패시터와 딜레이 회로를 사용한 게이트 드라이버

펄스 컨트롤 인버터가 짧고 빠르게 상승·하강하는 ON 펄스를 출력하기 위해 ON 펄스 출력 상단 스위치(S1)에 커패시터와 딜레이 회로를 사용한 게이트 구동 방식이 적용되었다. 그림 5는 게이트 드라이버의 동작 모드를 나타낸다.

그림 5(a)는 게이트 드라이버의 딜레이 동작을 나타낸다. 펄스 컨트롤러 출력이 변압기를 통해 게이트 드라이버로 입력됨에 따라 커패시터가 충전된다. 한편, 딜레이 회로에 의해 아직 게이트 충전 스위치가 꺼져 있어 메인 스위치 게이트에 충전 루프가 형성되지 않는다. 그림 5(b)는 인버터 스위치 게이트 충전 동작을 나타낸다. 일정 시간 후 딜레이 회로가 비활성화됨에 따라 게이트 충전 스위치가 켜지고 커패시터 양단 전압이 메인 스위치 게이트에 인가된다. 그림 5(c)에선 컨트롤러 출력의 극성이 바뀌게 됨에 따라 게이트 충전 스위치가 꺼지고 게이트 방전 스위치가 켜져 메인 스위치 게이트를 방전한다.

Pspice 시뮬레이션 툴을 이용하여, 펄스 컨트롤 인버터의 빠른 상승·하강 시간 및 좁은 펄스폭을 갖는 ON 펄스 출력을 위한 게이트 드라이버에 적용된 딜레이 동작 및 커패시터에 의한 게이트 충전 방식을 모의하였다. 펄스 컨트롤러 출력 펄스폭은 약 270ns, 변압기에 의한 누설 인덕턴스의 크기는 1uH, 커패시터는 1uH로 설정하였으며, 딜레이 구간의 길이를 0ns부터 250ns까지 늘려가며 결과를 확인하였다. 그림 6는 펄스 컨트롤러 출력과 딜레이 시간에 따른 인버터 스위치 (S1)의 게이트 입력 신호의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 시뮬레이션 결과는 설정된 딜레이 구간의 길이에 따라 입력되는 신호의 펄스폭보다 짧은 펄스폭을 갖는 게이트 입력 신호 생성이 가능함을 보여주며, 누설 인덕턴스의 영향을 받지 않고 빠른 상승·하강 시간이 구현되는 것을 보여준다.

### 3.3 바이패스 스위치를 사용한 게이트 드라이버

빠르게 상승하는 인버터 OFF 펄스를 출력하기 위해 OFF 펄스 출력 스위치(S2, S4)에 바이패스 스위치를 사

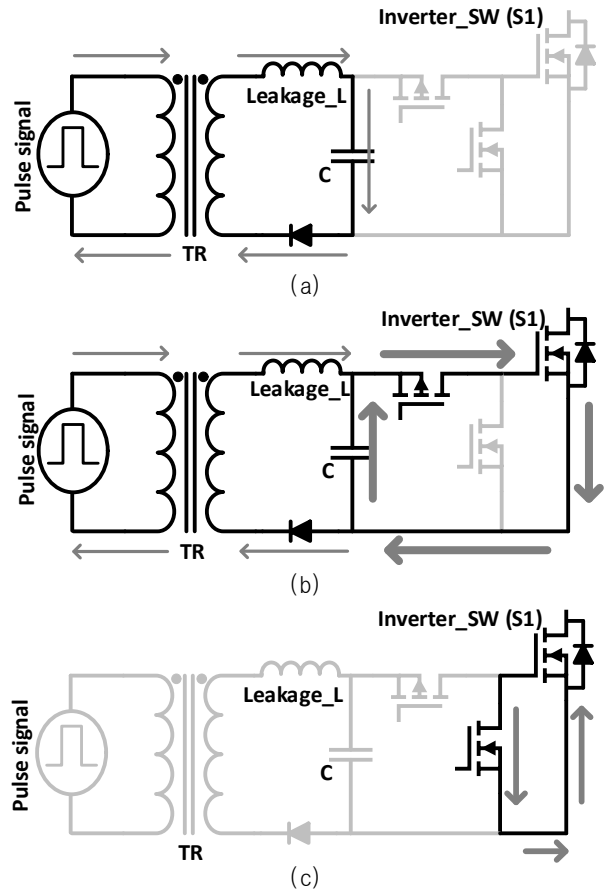


Fig. 5. Operational modes of inverter switch (S1). (a) Delay mode, (b) Gate charging mode, (c) Gate discharging mode.

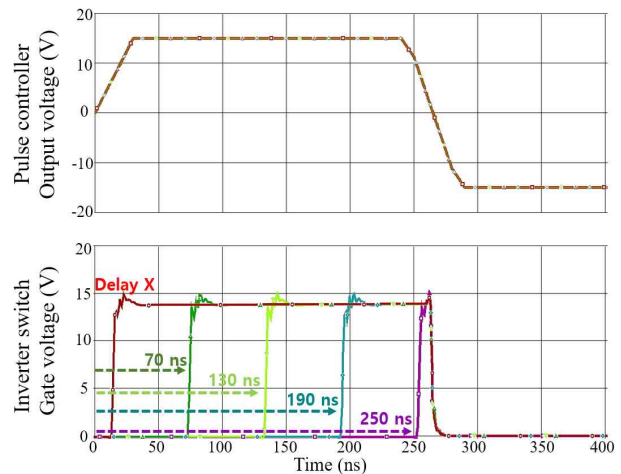


Fig. 6. Simulation results of gate driving scheme for narrow gate voltage.

용한 게이트드라이버가 적용되었다. 그림 7은 게이트 드라이버 동작 모드를 나타낸다.

그림 7(a)는 게이트 드라이버의 바이패스 동작을 보여준다. 펄스 컨트롤러 출력이 변압기를 통해 게이트 드라이버로 입력되면 기생 인덕턴스와 게이트 직렬 저항을 통해 흐르는 전류가 발생한다. 이 전류는 인버터 스위치

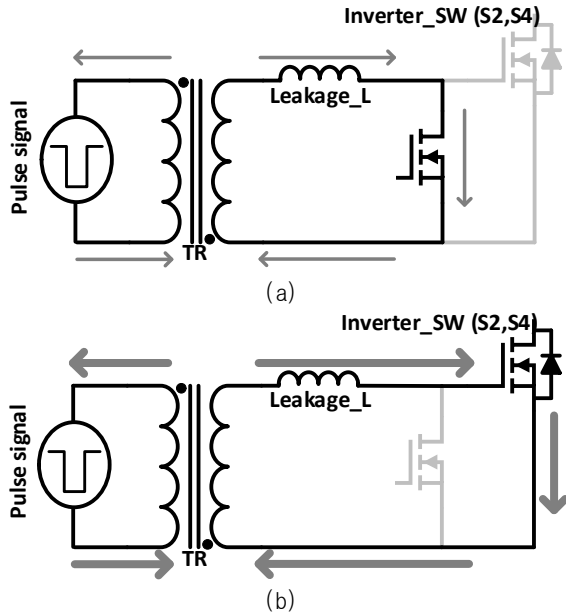


Fig. 7. Operational modes of inverter switch (S2/S4). (a) Bypass mode, (b) Gate charging mode.

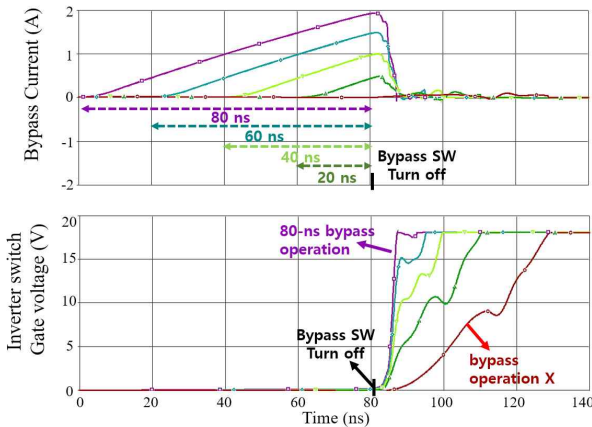


Fig. 8. Simulation results of gate driving scheme for fast-rising gate voltage.

게이트에 입력되지 않고 켜져 있는 바이패스 스위치에 의해 그라운드로 흐른다. 이때 바이패스 스위치에 흐르는 전류는 바이패스 동작 구간 동안 입력 전압에 의해 증가한다. 그림 7(b)는 인버터 스위치 게이트 충전 동작을 보여준다. 일정 시간 후 바이패스 스위치가 꺼지면 바이패스를 통해 흐르며 빌드업 된 높은 전류가 인버터 스위치 게이트를 빠르게 충전한다.

Pspice 시뮬레이션 툴을 이용하여, 펄스 컨트롤 인버터의 빠른 상승 시간을 갖는 OFF 펄스 출력을 위한 게이트 드라이버에 적용된 바이패스 동작 및 게이트 부스팅 방식을 모의하였다. 변압기에 의한 누설 인덕턴스의 크기는 1 $\mu$ H로 설정하였으며, 바이패스 구간의 길이를 0ns부터 80ns까지 늘려가며 결과를 확인하였다. 그림 8은 바이패스 동작 구간 길이에 따라 바이패스 스위치에 흐르는 바이패스 전류와 바이패스 전류의 피크에 따른

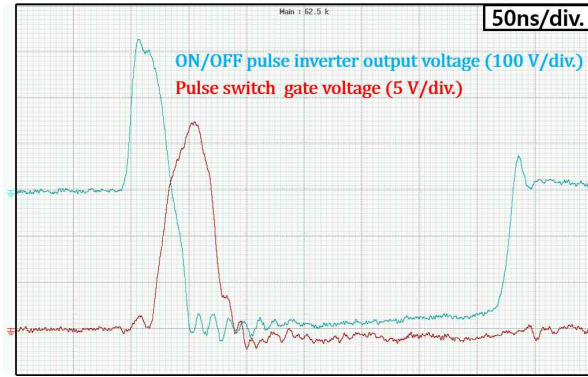


Fig. 9. Experimental waveforms of the control-loop gate control scheme.

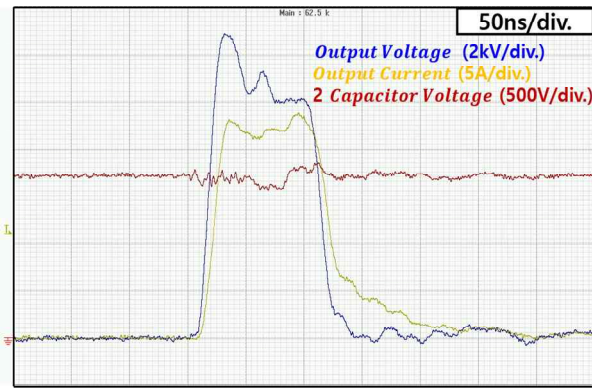


Fig. 10. Experimental waveform of 10 kV/45 A output pulse.

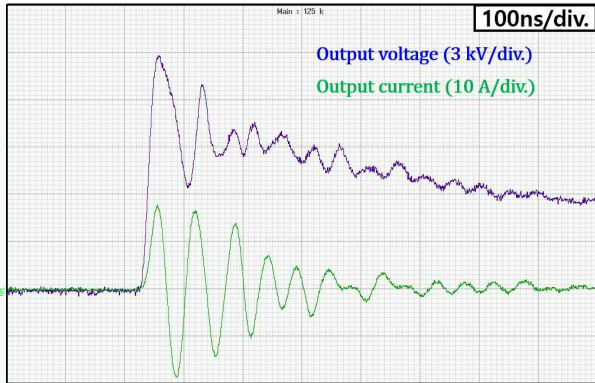
게이트 입력 전압의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 바이패스 동작 시간에 따라 바이패스 스위치 턴 오프 순간의 바이패스 피크 전류가 높아지며, 바이패스 피크 전류가 높아짐에 따라 인버터 스위치의 게이트가 빠르게 충전된다.

## 4. 실험

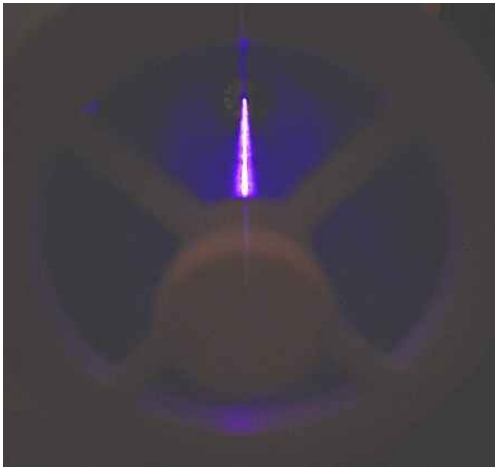
파워 셀 12개를 직렬 스택한 10kV급 펄스 파워 모듈레이터를 제작하여 펄스 파워 모듈레이터의 게이트 구동부 및 펄스 출력부의 동작을 검증하였다. 또한, 플라즈마 리액터 실부하에서의 펄스 출력 실험을 통해 실제 산업 적용에 대한 가능성을 확인하였다.

### 4.1 게이트 구동부 동작 실험

그림 9는 펄스 컨트롤 인버터의 출력과 인버터 출력 ON/OFF 펄스에 의해 동작하는 펄스 스위치 드라이버의 게이트 출력 전압을 보여준다. ON 펄스는 7ns의 빠른 상승 시간과 40ns의 짧은 펄스폭을 가지며, ON 펄스 출력 직후 바로 OFF 펄스가 출력되어 모든 펄스 스위치 드라이버를 빠르게 ON/OFF 트리거한다. 펄스 스위치 드라이버는 40ns의 펄스폭을 갖는 게이트 전압을 생성하여 펄스 스위치 게이트에 인가한다.



(a)



(b)

Fig. 11. Pulse discharge test under plasma reactor. (a) Experimental waveforms of output pulse voltage under plasma reactor load, (b) Corona discharge inside the reactor.

#### 4.2 10kV 나노초 펄스 파워 모듈레이터 저항 부하 출력 실험

그림 10은 펄스 파워 모듈레이터의 10kV, 22A 출력 펄스 파형을 보여준다. 출력 전압은 약 100ns의 펄스폭, 14ns의 상승 시간을 가진다. 일반적인 친환경 펄스 파워 응용분야에서 요구하는 50ns 이하의 상승 시간을 만족한다.

#### 4.3 10kV 나노초 펄스 파워 모듈레이터 플라즈마 리액터 부하 출력 실험

그림 11(a)는 플라즈마 리액터 부하 실험 파형을 보여준다. 부하로 사용되는 1000mm 길이에 100mm의 지름을 갖는 이 플라즈마 리액터는 가스 처리 장치에 실제 활용되고 있다. 플라즈마 리액터는 커패시턴스 부하 특성을 가지며 하강 시간이 매우 낮아 50kHz 고 반복률을 구현하기 위해 리액터에 12.5kΩ 풀 다운 저항이 병렬 연결되었다. 15ns의 상승시간을 갖는 15kV이 리액터에 인가되며, 그림 11(b)는 펄스 출력 동작 중에 리액터 내부에서 발생하는 코로나 방전을 보여준다.

## 5. 결론

본 논문에선 사용한 파워 셀 기반의 펄스 파워 모듈레이터의 나노초 펄스 출력을 위한 설계가 진행되었다. 스위칭 속도, 신뢰성, 비용을 고려한 펄스 스위치를 선정하였으며, 나노초 게이트 신호를 입력하여 빠른 동작을 구현하였다. 실험을 통해 펄스 컨트럴 인버터의 동작과 펄스 스위치 게이트 신호를 확인하였다. 또한, 무유도 저항 부하 및 플라즈마 리액터 부하를 이용한 고전압 출력 실험을 통해 제안하는 펄스 파워 모듈레이터의 성능을 검증하였다.

이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (NRF-2020R1A2C2099663).

본 연구는 2018년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.20184030202270)

## References

- [1] H. Ayan, G. Fridman, A. F. Gutsol, V. N. Vasilets, A. Fridamn, and D. Friedman, "Nanosecond-pulsed uniform dielectric barrier discharge," *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 36, No. 2, pp. 504-508, Apr. 2008.
- [2] K. Yan et al., "A high-voltage pulse generator for corona plasma generation," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 38, No. 3, pp. 866-872, May 2002.
- [3] S. R. Jang, G. H. Rim, C. G. Cho, S. H. Song, S. M. Park, and H. J. Ryoo, "A 120kV, 5kA multipurpose pulsed-power generator using a semiconductor switch and magnetic pulse compression," *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 45, No. 10, pp. 2678-2682, Oct. 2017.
- [4] J. Rao, K. Liu, and J. Qiu, "All solid-state nanosecond pulsed generators based on Marx and magnetic switches," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 20, No. 4, pp. 1123-1128, Aug. 2013.
- [5] Y. Mi, C. Bian, P. Li, C. Yao, and C. Li, "A modular generator of nanosecond pulses with adjustable polarity and high repetition rate," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 33, No. 12, pp. 10654-10662, Dec. 2018.
- [6] H. Li, H. Ryoo, J. Kim, G. Rim, Y. Kim, and J. Deng, "Development of rectangle-pulse marx generator based on PFN," *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 37, No. 1, pp. 190-194, Jan. 2009.
- [7] M. Hochberg et al., "A fast modular semiconductor-based marx generator for driving dynamic loads,"

*IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 47, No. 1, pp. 627-634, Jan. 2019.

- [8] S. H. Ahn, H. J. Ryoo, G. W. Gong, and S. R. Jang, "Robust design of a solid state pulsed power modulator based on modular stacking structure," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 30, No. 5, pp. 2570-2577, May 2015.
- [9] S. Ok, H. Ryoo, S. Jang, S. Ahn, and G. Goussev, "Design of a high-efficiency 40kV, 150A, 3kHz solid-state pulsed power modulator," *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 40, No. 10, pp. 2569-2577, Oct. 2012.
- [10] S. H. Lee, S. H. Song, H. Jo, and H. J. Ryoo, "Solid-state bipolar pulsed-power modulator based on a half-bridge power cell structure," *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 47, No. 10, pp. 4466-4472, Oct. 2019.
- [11] S. Jang, C. Yu, and H. Ryoo, "Simplified design of a solid state pulsed power modulator based on power cell structure," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 65, No. 3, pp. 2112-2121, Mar. 2018.
- [12] S. Jang, H. Ryoo, G. Goussev, and G. H. Rim, "Comparative study of MOSFET and IGBT for high repetitive pulsed power modulators," *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 40, No. 10, pp. 2561-2568, Oct. 2012.



### **이승희(李升熙)**

1995년 1월 17일생. 2019년 중앙대 에너지시스템공학부 졸업. 2019년~현재 동 대학원 에너지시스템공학과 석사과정.



### **송승호(宋丞鎬)**

1989년 1월 19일생. 2016년 광운대 전기공학과 졸업. 2016년~현재 중앙대 에너지시스템공학과 석·박통합과정.



### **류홍제(柳泓齊)**

1969년 3월 4일생. 1991년 성균관대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2004년~2005년 미국 위스콘신 메디슨대 초빙연구원. 1996년~2015년 한국 전기연구원 전기추진연구본부 책임연구원(팀장, 랩장, 센터장). 2005년~2015년 과학기술연합대학원 에너지변환공학 책임교수. 2015년~현재 중앙대 에너지시스템공학부 교수. 당 학회 학술위원장.