

나노초 펄스 기반 소형 1.5kV급 펄스 모듈레이터 설계

강운수, 안재범, 조현빈, 정승재, 류홍제
 중앙대학교

Design of a compact 1.5kV pulse modulator based on nanosecond pulses

Yun-Soo Gang, Jae-Beom Ahn, Hyun-Bin Jo, Seung-Jae Jeong, Hong-Je Ryoo
 Chung-Ang University

ABSTRACT

This paper discusses the design and implementation of a compact 1.5kV pulse modulator based on nanosecond pulse technology. Developing a power supply device with nanosecond pulse width requires various requirements such as fast rising time and falling time. This paper presents the design of a pulse controller and gate driver for implementing a nanosecond pulse modulator. To select the comparator with a fast rising time for the pulse controller based on the requirements of the power supply device with nanosecond pulse width, the performance comparison of each comparator and the experimental results are presented. Based on the results, a gate signal modulation technique with a minimum pulse width of 150ns is proposed by applying the selected comparator. In addition, a module consisting of a 1200V rated discharge switch and a pull-down switch is used to achieve nano-second-based 1.5kV pulse output. The gate signal generated by this module is used to implement a 1.5kV pulse output. Therefore, the performance of the proposed modulator is verified through experimental results of 1.5kV and 150ns pulse output under resistive load conditions.

1. 서론

의료, 군사, 산업 등 다양한 응용분야에 사용되는 펄스 파워 모듈레이터의 수요가 증가함에 따라 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 플라즈마 응용분야에서는 나노초 단위의 펄스를 요구한다. 반도체 스위치를 사용하여 펄스를 발생시키고 MPC, PEN, spark gap을 연계하여 펄스 상승율을 높이는 방식들이 제안되었다. 하지만 이는 낮은 효율 및 발열로 전원장치의 고려사항이 존재하며, 이러한 나노초 단위의 펄스 생성 기술은 여전히 고비용이며, 크고 복잡하다.[1]-[3]

나노초 펄스를 출력하기 위하여 빠른 rising time 및 falling time 등의 사양이 요구된다. 본 논문에서는 이러한 요구사항을 고려하여, 펄스 컨트롤러의 지령 바디 펄스 생성을 위한 비교기를 선정하고, 이를 적용하여 150 ns의 펄스폭을 갖는 게이트 신호 모듈레이션 기법을 제시한다.

또한, 나노초 기반의 1.5 kV 펄스 출력을 위해 1200 V 방전

스위치, 풀다운 스위치, 스토리지 커패시터 등으로 구성된 총 2개의 파워셀을 기반으로 구현한다. 2.1절에서는 나노초 기반 펄스 모듈레이터의 구조에 대해 설명하고, 2.2절에서는 나노초 펄스 구현하는 방식을 설명한다. 2.2절에서 설명한 나노초 펄스 구현을 기반으로 2.3절에서 게이트 구동 방식을 설명하며, 2.4절에서 시뮬레이션 및 검증에 대해 논의한다. 2.5절에선 실험결과를 나타내며, 나노초 펄스출력 검증을 한다. [1]

2. 본론

2.1 펄스모듈레이터 구조

본 논문에서 제시한 나노초 기반 펄스 모듈레이터는 크게 충전부, 펄스 방전부, 게이트구동부로 구성되어있다. 이에 대한 구조는 그림1에 나타나있다.

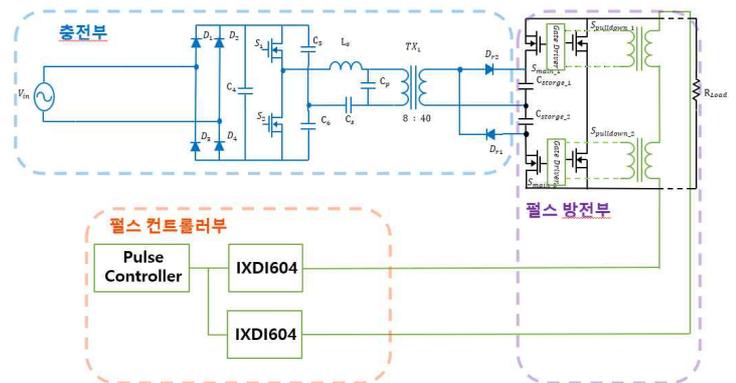


그림1. 펄스모듈레이터 전체 구조
 Fig. 1 Pulse modulator total circuit

충전부 토폴로지는 변압기에 바이폴라 전압이 인가되는 토폴로지중 콤팩트 설계가 가능한 하프브릿지 인버터로 선정하였다. 커패시터 충전기는 LCC 공진형 컨버터 기반으로 설계되었으며, 배압회로를 통해 정류된 전압이 스토리지 커패시터에 충전된다.

방전부는 스토리지 커패시터, 방전 스위치, 풀다운 스위치로 구성된다. 하나의 스토리지 커패시터에는 약 750 V가 충전되며, 펄스 방전시 두 개의 스토리지 커패시터가 직렬로 구성되

어 1.5 kV 출력을 달성한다.

2.2 나노초 펄스 구현

펄스 컨트롤러의 비교기를 통해 지령 바디펄스 신호가 생성되며, 나노 초 기반의 펄스폭을 갖는 펄스 모듈레이터는 빠른 상승시간 및 하강시간이 중요한 요소로 작용한다. 이를 위해서 비교기 3종 (LM2903, ADCMP600, MAX999)의 상승시간을 비교한 결과를 표1에 나타내었다. 그 중 빠른 상승시간 및 슬루율이 높은 MAX999 모델을 바디펄스 출력을 위한 비교기로 선정하여 적용 및 검증을 하였다.

표 1 비교기 사양 비교테이블

Table1. Comparator Specification Comparison Table

	LM2903	ADCMP600	MAX999
Rising time	50 ns	7.2 ns	6.0 ns
Slew rate	100[V/us]	694[V/us]	840[V/us]

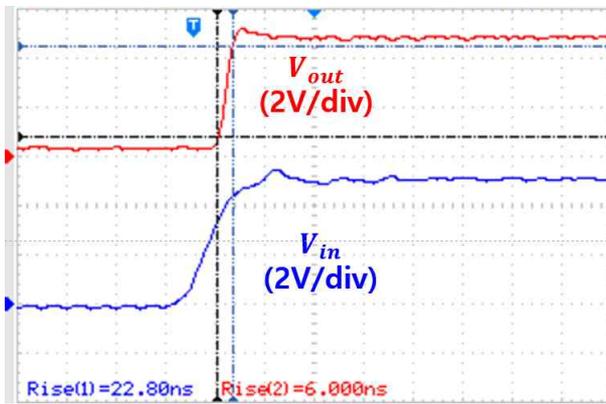


그림 2 선정된 비교기 (MAX999) 상승시간 측정

Fig. 2 Measurement of Rising Time of selected comparator (MAX999)

Voltage to Frequency 변환기는 전압을 주파수로 변환하며, 지령 전압에 따른 반복율을 갖는 펄스 신호를 출력한다. 비교기는 지령전압에 따른 펄스폭을 갖는 바디 펄스를 출력한다. 바디펄스는 반전회로 및 미분회로를 통해 On-Off 시그널을 생성하며 IXDI에 입력된다. IXDI는 MOSFET 또는 IGBT등의 스위치의 게이트 구동을 위해 신호를 증폭하기 위한 Power IC 소자이다. IXDI의 Vcc의 범위는 $4.5 V \leq V_{cc} \leq 35 V$ 내에서 사용되며, 본 논문에서 제시된 IXDI의 Vcc는 30 V로 사용되었다. 별도의 인버터 회로를 사용하지 않고, Power IC만으로 스위치에 충분한 게이트 파워를 공급하도록 Vcc 전압이 선정되었다.

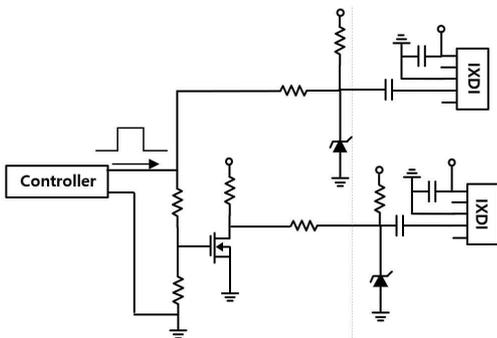


그림 3 IXDI기반 나노초 펄스 구현 회로도

Fig. 3 Circuit for Nanosecond Pulse Implementation based on IXDI

2.3 게이트 구동 방식

게이트 구동 방식은 인버터를 사용하지 않고 Power IC만으로 컨트롤 루프를 통해 게이트 신호와 파워를 공급하는 방식이다. 컨트롤 신호는 게이트 변압기를 통해 방전 스위치 및 풀다운 스위치의 통합형 게이트드라이버에 전달된다. On-Off 시그널을 통해 방전 스위치와 풀다운 스위치를 모두 구동한다. On 시그널 인가시 방전 스위치의 게이트전압이 충전되며, Off 시그널 인가시 방전 스위치의 게이트전압은 방전되고 풀다운 스위치의 게이트전압이 충전된다. 한 모듈은 방전스위치, 풀다운 스위치 총 2개의 스위치로 구성되며 하나의 게이트 구동회로를 통해 2개의 모듈, 총 4개의 스위치가 구동되는 방식이 사용된다. 풀다운 스위치는 부하단의 기생 커패시터에 저장된 에너지를 빠르게 방전시켜줌으로써 펄스폭을 최소화하기 위해 사용되었다.

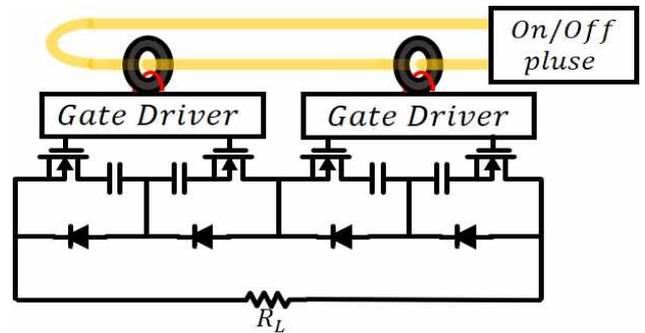


그림 4 게이트 구동 방식

Fig. 4 Gate Driving Method

2.4 시뮬레이션 검증

Pspice 시뮬레이션 툴을 이용하여, 충전부 시뮬레이션을 수행한 모습을 그림5에 나타내었다. 시뮬레이션 결과 1.5 kV로 스토리지 C에 안정적으로 충전되는 결과를 나타내었으며, 공진전류 또한 2 A 및 -2 A로 설계조건을 만족하였다.



그림 5 충전시 시뮬레이션 결과

Fig. 5 Simulation Results of Charger

2.5 실험 결과

IXDI의 on-off 펄스 출력과 이를 컨트롤루프를 통하여 게이트 구동회로의 입력으로 들어가 방전스위치 및 풀다운 스위치의 G-S 전압을 측정된 파형을 그림 6에 나타내었다. on-off 펄스에서 발생하는 링잉은 도선내의 기생인덕턴스와 내부 커패시터의 공진에 의한 것으로 보인다. 빠른 스위칭을 위해 방전 스위치의 게이트 전압 16.2 V, 풀다운 스위치의 게이트 전압은 20 V 수준으로 설계 했다.

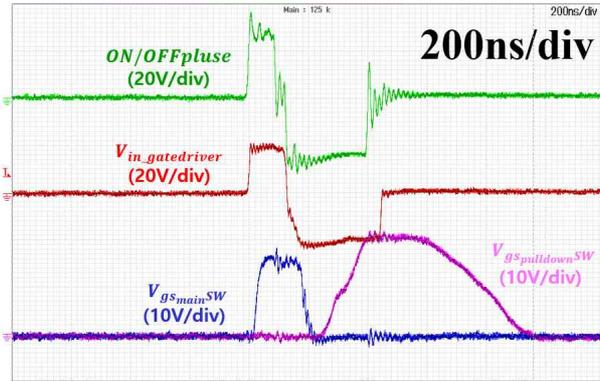


그림 6 IXDI On - Off 펄스 출력 및 방전 스위치와 풀다운 스위치 Vgs
 Fig. 6 IXDI On - Off Pulse Output and Vgs of Discharge and Pull-Down Switch

그림 7은 스토리지 커패시터에 800 V까지 충전되며 방전 및 풀다운 스위치의 동작을 통해 펄스 출력된 실험파형이다. 저항 부하는 rising time 및 falling time 특성을 고려하여 무유도 저항 10 Ω이 사용되었다. 실험 결과 on-off 펄스가 인가됨에 따라 rising time 80.26 ns, falling time 43.98 ns, 펄스폭 160 ns의 펄스출력을 달성하였다.

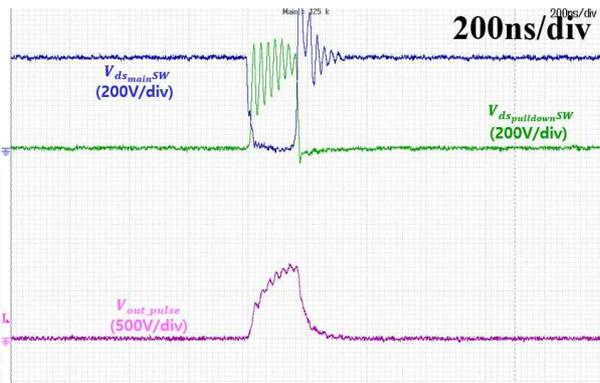


그림 7 800 V 펄스 방전 수행 실험 결과
 Fig. 7 Experimental Results of 800V Pulse Discharge

3. 결론

본 논문에서는 나노초 펄스 기반으로 한 소형 1.5 kV급 펄스 모듈레이터 설계 및 구현이 진행되었다. 빠른 상승시간 및 하강시간을 주 요소로 고려하여 비교기 선정을 하였으며,

선정된 비교기를 기반으로 하여 나노초 펄스를 생성하였다. 이는 IXDI의 입력으로 사용되어 On - Off 펄스 신호를 생성하며, IXDI기반으로 방전스위치 및 풀다운 스위치를 구동하여 게이트 신호를 확인하였다. 또한 스토리지 커패시터에 800 V까지 충전하여 펄스 방전 실험을 수행한 결과, 본 논문에서 제안하는 나노초 펄스 기반의 1.5 kV 펄스모듈레이터 성능을 검증하였다.

본 연구는 2020년도 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원 (No.NRF2020R1A2C2099663)을 받아 수행된 연구 과제입니다.

참고 문헌

- [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] S. R. Jang, G. H. Rim, C. G. Cho, S. H. Song, S. M. Park, and I. J. Ryoo, "A 120KV. SkA 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,
- [3] 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,