

40kV 나노초 펄스발생용 모듈형 solid-state Marx modulator 설계

배정수*, 김태현*, 손성호*, 유찬훈**, 김형석**, 장성록***
 과학기술연합대학원대학교*, 한국전기연구원**

Modular design of solid-state Marx modulator for 40kV nanosecond pulse

Jung-Soo Bae*, Tae-Hyun Kim*, Seong-Ho Son*, Chan-Hun Yu**, Hyoung-Suk Kim**,
 Sung-Roc Jang***

University of Science & Technology*, Korea Electrotechnology Research Institute**

ABSTRACT

본 논문은 40 kV 나노초 펄스발생을 위한 모듈형 solid-state Marx modulator(SSMM) 설계에 대해 기술한다. 가속기 및 플라즈마 어플리케이션과 같은 다양한 응용분야에 요구되는 전압 및 전류 사양을 만족시키기 위해 10 kV(출력 전압), 50 ns(펄스폭), 20 ns(상승&하강 시간), 100 kHz(반복률)의 사양을 만족하는 단위모듈기반으로 모듈형 설계를 제안한다.

독립적인 제어가 가능한 4개의 단위모듈을 기반으로 제안된 SSMM은 임의의 출력 파워 및 임피던스를 만족시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 예를 들어, 모든 단위모듈의 위상을 같게 했을 때 출력전압을 증가시킬 수 있으며 각 모듈의 위상을 지연하였을 경우는 펄스의 반복률을 크게 높일 수 있다.

개발된 SSMM은 직렬 스택 MOSFET의 스위칭 성능을 향상시키기 위해 게이트 구동 회로는 동기 신호와 구동 전력을 제공하는 1 턴 변압기로 설계되었다. 출력 펄스의 폭과 하강 시간을 최소화하기 위해 다이오드 대신 기생 커패시턴스에 저장된 에너지를 빠르게 방출하는 액티브 풀다운 회로가 적용되었다. 또한, 출력 펄스의 빠른 상승을 달성하기 위해 게이트의 라인 인덕턴스를 최소화하고 모든 게이트 신호의 동기화는 필수적이다. 개발된 ns급 펄스전원장치는 단위모듈을 기반으로 최대 펄스전압이 40 kV 까지 출력이 가능하며 이에 대한 상세 설계 및 구현은 실험결과를 바탕으로 검증한다.

1. 서 론

최근 환경, 의료, 농업, 식품 등 다양한 산업응용분야에서 고전압 펄스전원장치에 대한 수요가 증가하고 있다.[1-5] 이에 따라, 고전압 펄스를 발생하고 임의의 출력파위에 대응하기 위해 solid-state Marx 회로기반의 모듈형 펄스전원장치가 개발되고 있다.[6,7] 고전압 펄스 출력 외에도 펄스의 빠른 상승 및 하강시간이 플라즈마 및 가속기 시스템의 주요 요구사항이다.[8,9] 빠른 스위칭 속도를 요구하는 고전압 펄스 응용 분야의 경우, 실리콘 카바이드 모스펫 (SiC MOSFET)와 같은 광대역 갭 반도체 소자를 주로 이용한다.[10] 예를 들어, SiC MOSFET은 on-state 저항이 낮고 스위칭 속도가 빠를 뿐만 아니라 스위칭 손실을 저감시킨다.

본 논문에서는 이러한 요구사항을 만족시키기 위해 SiC MOSFET 기반의 solid-state Marx modulator (SSMM) 설계

를 바탕으로 한다. 개발된 SSMM은 다양한 응용분야 사양을 만족하기 위해 모듈형 구조로 설계되었으며, 각 단위모듈 펄스전원장치는 위상 제어가 가능한 입력신호를 이용하여 다양한 전압 및 반복률 조성이 가능하다. 또한 SiC MOSFET의 스위칭 속도를 극대화시키기 위해 게이트 구동전류, 기생 커패시턴스, 누설 인덕턴스 등을 고려하여 설계된다. 특히 다수의 스위치를 동기 구동하는 것이 출력 펄스의 상승 및 하강시간을 결정하는 가장 큰 요소이며, 이를 구현하기 위해 한 턴의 컨트롤투프 구조를 제안하여 게이트 신호를 동기화 한다.

2. 제안된 회로의 동작 원리

그림 1과 같이, 제안하는 펄스전원장치의 전체 회로는 다수의 파워셀을 포함한다. 파워셀은 에너지 저장을 위한 커패시터 ($C_{S,1} \sim C_{S,N}$), 펄스를 인가하기 위한 온 스위치($S_{ON,1} \sim S_{ON,N}$)와 펄스를 풀다운 시키고 커패시터를 충전하기 위한 오프 스위치($S_{OFF,1} \sim S_{OFF,N}$) 총 3개의 컴포넌트로 구성된다. 온, 오프 스위치에 게이트 신호와 구동 전류를 전달하기 위한 한 턴의 컨트롤투프는 모든 게이트 구동변압기($TR_{G,1} \sim TR_{G,N}$)를 커플링 시킨다. 이때 컨트롤투프의 전압은 풀브릿지 인버터 기반의 온-오프 펄스 발생기에 의해 인가된다.

충전다이오드($D_{charging,1} \sim D_{charging,N}$)와 오프 스위치를 통해 다수의 커패시터는 DC 충전기로부터 병렬로 충전된다. 온 스위치가 도통되면 충전된 커패시터는 부하에 펄스를 인가하기 위해 직렬로 연결되는 구조이다. 개발된 40 kV SSMM의 사양은 표 1 과 같이 요약된다.

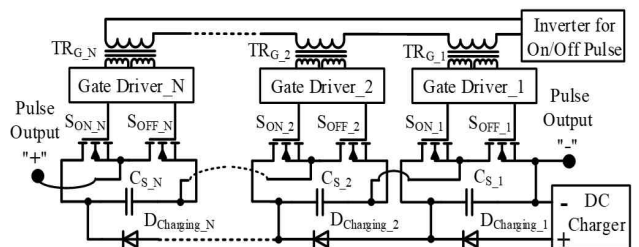


그림 1 파워셀 기반의 전체 회로도
 Fig. 1 Overall circuit based on power cell

표 1 개발된 40kV 펄스전원장치 사양

Table 1 Specifications of the developed 40kV SSMM

최대 펄스 출력전압 [kV]	40
최대 펄스 전류 [A]	200
펄스 반복률 [kHz]	400
펄스 폭 [ns]	45~100
펄스 상승시간 [ns@kV]	10@40
펄스 하강시간 [ns@kV]	8@40

3. 제안된 펄스전원장치의 장점

3.1 펄스의 빠른 상승시간

SiC MOSFET은 빠른 동특성과 낮은 기생 커패시턴스를 가지기 때문에 온, 오프 스위치에 적용하여 펄스의 빠른 상승 하강시간을 달성할 수 있다. 뿐만 아니라 SiC MOSFET의 스위칭 속도를 극대화하기 위해 몇 가지 고려사항이 있다.

무엇보다도 게이트 구동용 변압기로부터 전달되는 전류 라인의 모든 누설 인덕턴스 값을 최소화하여야 한다. 게다가, MOSFET의 빠른 상승 시간은 게이트 구동 전류 값에 의해 결정된다. 더 높은 구동 전력을 공급하기 위해서 게이트 전압은 가능한 한 높게 설정하는 것이 유리하다. 더 나아가, 출력 펄스의 상승시간을 개선시키기 위해서 모든 게이트 신호의 동기는 필수적이다. 그렇기 때문에 한 턴의 컨트롤 루프를 통해 온, 오프 스위치에 동기화 된 게이트 신호를 제공한다.

3.2 모듈화 및 유연성 구조

가속기 및 플라즈마 시스템과 같은 다양한 응용분야로부터 요구되는 사양을 만족시키기 위해서 개발된 SSMM은 모듈형 구조를 바탕으로 설계되었다. 위상 제어가 가능한 디지털 신호 발생기가 내장된 단위 모듈을 기반으로 각 모듈의 출력 펄스를 독립적으로 제어할 수 있다. 이는 개발된 SSMM이 출력 펄스를 조정하여 임의의 출력 전력 및 임피던스를 대응할 수 있음을 의미한다.

예를 들어, 각 모듈의 입력신호가 동일한 위상으로 동기화되면 펄스전원장치는 출력 펄스 전압을 증가시킬 수 있다. 다른 경우에, 각 단위 모듈의 입력 신호를 의도적으로 지연시킴으로써, 출력 펄스의 반복률을 크게 증가시킬 수 있다. 또한 단위 모듈의 차동 연결을 통해 펄스전원장치의 출력되는 전압을 양극성 펄스로 동작이 가능하다. 이러한 출력 유연성으로 인해 모듈형 펄스전원장치는 산업 응용 분야에서 다양한 확장성을 제공한다.

4. 실험 결과 및 나노펄스 측정

4.1 게이트 동기 측정

40 kV 나노초 펄스의 실험을 수행하기 위해 제안된 SSMM은 48개의 파워셀로 구성된다. 동일한 위상을 가지는 입력 신호를 바탕으로 48개의 온, 오프 스위치의 게이트 동기 신호가 그림 2와 같이 측정된다. 출력 펄스의 상승시간과 관련이 있는 온 스위치의 게이트 전압은 18V로 설계되어 SiC MOSFET의 빠른 스위칭 특성을 극대화한다.

4.2 40kV 나노초 펄스 부하실험

개발된 SSMM은 상대적으로 최소 누설 인덕턴스와 기생 커패시턴스

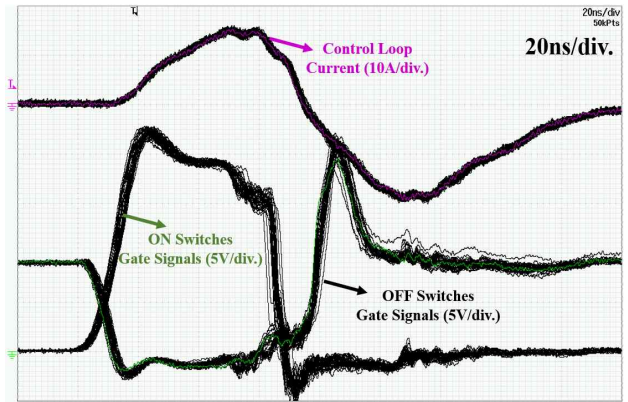


그림 2 48개의 온, 오프 스위치의 게이트 동기신호
Fig. 2 Synchronized gate signal of 48 ON and OFF switches

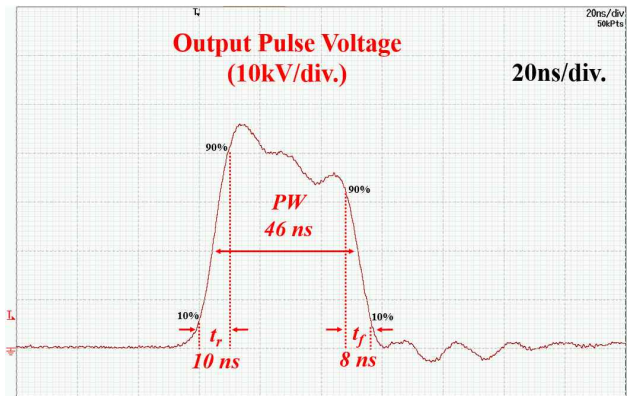


그림 3 40 kV 출력 펄스 파형
Fig. 3 Output pulse waveform at 40 kV

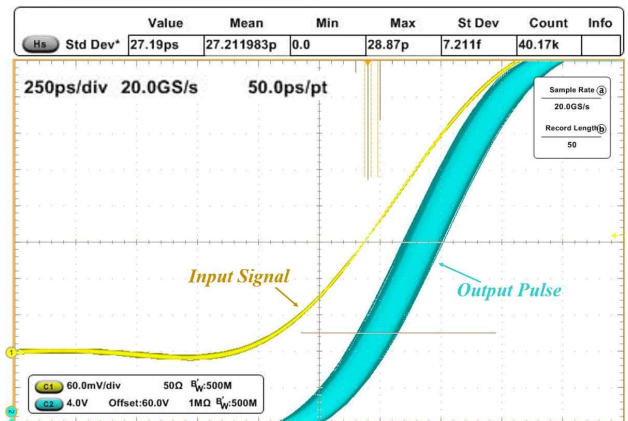


그림 4 출력 펄스 지터 측정파형
Fig. 4 Jitter measurement of output pulse

패시턴스 성분을 갖는 2kΩ 부하저항을 이용하여 테스트가 진행되었다. 그림 3과 같이 실험 파형은 출력펄스가 40 kV, 46 ns (펄스폭), 10 ns (상승시간), 8 ns (하강시간)로 측정되었음을 보여준다. 본 실험은 저항 부하 및 파워 라인에 불가피한 기생 성분이 있기 때문에 최대 46 kV(최대 펄스 전압)의 오버슈트가 발생하였다.

4.3 지터 측정

그림 4와 같이 출력 펄스의 지터는 20 Gs/s의 높은 샘플링 속도를 갖는 오실로스코프에 의해 측정되었다. 입력 디지털 신호를 트리거하여 측정된 출력 펄스의 표준 편차는 카운트 수가 40,000을 기준으로 30 ps 미만으로 측정되었다. 추가적으로 고전압 나노초 펄스를 측정하기 위한 모든 항목이 표 2에 요약된다.

표 2 고전압 나노초 펄스 측정 장비

Table 2 Instruments of high voltage nanosecond pulse measurement

항목	모델 (회사명)
부하저항	RT818A101k(100Ω * 20 = 2kΩ, HVR)
고전압 프루브	P6015A (TEKTRONIX)
오실로스코프	DLM2054 (YOKOGAWA) DPO7354 (TEKTRONIX)
입력 신호	T560 DIGITAL DELAY GENERATOR (HIGHLAND)

5. 결 론

본 논문은 가속기 및 플라즈마 어플리케이션과 같은 다양한 응용분야에 요구되는 전압 및 전류 사양을 만족시키기 위해 단위모듈기반으로 한 모듈형 펄스전원장치 설계에 대해 소개하였다. 특히 중요하게 요구되는 조건으로 펄스의 빠른 상승, 하강 시간을 달성하기 위해 여러 가지 고려사항을 적용하여 설계하였으며, 이를 실험을 통해 검증하였다. 또한 독립적인 제어 가능한 4개의 단위모듈을 기반으로 제안된 SSMM은 모듈화 및 유연성에 적합한 구조로 설계되었다.

검증된 실험결과를 바탕으로 향후 고 반복률 및 양극성 펄스에 대해서도 테스트 할 예정이다.

이 연구는 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 주요사업(No. 20A01015)

참 고 문 헌

- [1] Sakugawa et al., "A Method of Cyanobacteria Treatment Using Underwater Pulsed Streamer-Like Discharge," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 42, no. 3, pp. 794-798, March 2014.
- [2] Sugai, P. T. Nguyen, T. Maruyama, A. Tokuchi and W. Jiang, "The Effect of Scale-Up of Pulsed Corona Discharge for Treatment of Pollution Water Sprayed in Discharge Gap," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 44, no. 10, pp. 2204-2210, Oct. 2016.
- [3] G. Li, "Flue gas treatment and carbon recycling for clean electric energy," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 18, no. 4, pp. 1287-1292, August 2011.
- [4] K. Takaki et al., "Application of ies pulsed power generator for mushroom cultivation," 2007 16th IEEE International Pulsed Power Conference, Albuquerque, NM, 2007, pp. 1253-1256.
- [5] S. Li et al., "Oxidation and Biodecontamination Effects of Impulsive Discharges in Atmospheric Air," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 44, no. 10, pp. 2145-2155, Oct. 2016.
- [6] W. Jiang, "Solid-State LTD Module Using Power MOSFETs," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 38, no. 10, pp. 2730-2733, Oct. 2010.
- [7] W. Jiang, H. Sugiyama and A. Tokuchi, "Pulsed Power Generation by Solid-State LTD," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 42, no. 11, pp. 3603-3608, Nov. 2014.
- [8] M. Sack, S. Keipert, M. Hochberg, M. Greule and G. Mueller, "Design Considerations for a Fast Stacked-MOSFET Switch," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 41, no. 10, pp. 2630-2636, Oct. 2013.
- [9] H. Canacsinh, J. F. Silva and L. M. Redondo, "Rise-Time Improvement in Bipolar Pulse Solid-State Marx Modulators," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 45, no. 10, pp. 2656-2660, Oct. 2017.
- [10] C. H. Yu, S. R. Jang, H. S. Kim and H. J. Ryoo, "Gate Driving Circuit With Active Pull-Down Function for a Solid-State Pulsed Power Modulator," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 1, pp. 240-247, Jan. 2018.