DBpia

빠른 상승 시간을 갖는 반도체 스위치 기반 막스 모듈레이터를 위한 전력용 반도체 스위치 분석

Analysis of Semiconductor Switches for Solid-State Marx Modulators with Fast Rise Times

저자 (Authors)
이승희, 송승호, 류홍제
Seung-Hee Lee, Seung-Ho Song, Hong-Je Ryoo

출처 (Source)
조명·전기설비학회논문지 35(4), 2021.4, 41-47 (7 pages)
Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers 35(4), 2021.4, 41-47 (7 pages)

발행처 (Publisher)
한국조명·전기설비학회
The Korean Institute of Illuminating and electrical Installation Engineers

URL
http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10548450

APA Style
이승희, 송승호, 류홍제 (2021). 빠른 상승 시간을 갖는 반도체 스위치 기반 막스 모듈레이터를 위한 전력용 반도체 스위치 분석. 조명·전기설비학회논문지, 35(4), 41-47.

이용정보 (Accessed)
중앙대학교
165.194.94.***
2022/01/25 14:49 (KST)

저작권 안내
DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information
Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s)and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s)for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2021) 35(4) : 41～47
http://doi.org/10.5207/JIEIE.2021.35.4.041 ISSN 1229-4691(Print) ISSN 2287-5034(Online)
논문 35-4-7

빠른 상승 시간을 갖는 반도체 스위치 기반 막스 모듈레이터를 위한 전력용 반도체 스위치 분석

(Analysis of Semiconductor Switches for Solid-State Marx Modulators with Fast Rise Times)

이승희* · 송승호** · 류홍제†
(Seung-Hee Lee · Seung-Ho Song · Hong-Je Ryoo)

Abstract

This paper deals with the comparison, analysis, and selection of semiconductor switches for discharge switches of solid-state pulsed power modulators with fast rise times. When designing a pulsed power modulator with nanoseconds rise times, it is required to select a discharge switch with fast turn-on switching. In order to select a appropriate discharge switch, a test circuit that can compare and analyze the rise time of a semiconductor switch at a level of a single cell was designed, and comparative experiments were conducted under various current conditions. The discharge switch was selected by comparing the rise time, arc reliability, and price with various perspectives. A 10-kV Marx modulator with the selected semiconductor switch was tested. The results were verified that the 10 kV output pulses have fast rise times of 20ns or less.

Key Words : Fast rise time, Power semiconductor switch, Pulsed power supply

1. 서 론

최근 친환경 수 처리 시스템 및 가스 처리 시스템에 관한 관심이 증가함에 따라 친환경 펄스 응용 분야에 적용 가능한 펄스 모듈레이터의 연구가 활발히 진행 중이다[1]-[9]. 기존의 방식으로 방전 스위치로 사이러트론, 이그나이트론, 스파크 갭과 같은 기계식 스위치를 사용하여 고전압 펄스를 생성하였다[3]-[5]. 하지만 기계식 스위치가 가지는 펄스 반복률, 수명, 펄스 재현성의 제약으로 기계식 스위치를 대체하여 반도체 스위치로 펄스를 발생시키는 연구가 수행되었다. 반도체 스위치의 사용으로 펄스 모듈레이터는 빠른 반복률, 장수명, 높은 펄스 재현성, 용이한 펄스 제어를 실현할 수 있었다.

반도체 스위치는 기계식 스위치에 비해 비교적 낮은 전압 정격을 가져 단일 스위치로는 고전압 펄스를 발생시키기 어렵다. 반도체 스위치의 전압 정격을 극복하고 고전압 펄스를 발생시키는 방법 중 막스 방식이

† Corresponding Author : Professor, Department of Energy system Engineering, Chung-Ang University, Korea
Tel : 02-820-5178
E-mail : hjryoo@cau.ac.kr
https://orcid.org/0000-0001-8657-7350
* Engineer, High Voltage Evaluation Division, Korea Electrotechnology Research Institute, Korea
https://orcid.org/0000-0002-1777-9765
** Intergrated M.S. and ph.D course, Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Korea
https://orcid.org/0000-0003-1893-1674
Received : February 10, 2021
Revised : February 19, 2021
Accepted : March 12, 2021

Copyright ⓒ 2021 KIIEE All right's reserved
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

중앙대학교 | IP:165.194.94.*** | Accessed 2022/01/25 14:49(KST)

있다. 반도체 스위치 기반 막스 모듈레이터는 여러 스테이지들을 직렬로 연결하여 각 스테이지가 발생시킬 수 있는 전압의 합을 부하에 인가한다. 한편 친환경 응용 분야에 적용되기 위해서 펄스 모듈레이터는 고전압 뿐만 아니라 빠른 상승 시간에 대한 요구도 만족해야 한다. 친환경 응용 분야에서 요구하는 수십 나노초의 상승 시간을 만족하기 위해 반도체 스위치 기반 막스 모듈레이터에 pulse forming line(PFL) 또는 magnetic pulse compressor(MPC)를 추가하는 방식들이 제안되었다[6]-[9]. 하지만 PFL의 사용으로 부하와 펄스 모듈레이터 간의 임피던스 매칭에 관한 추가적인 고려 사항이 발생하여 출력 펄스를 조절하기 어려워지며, MPC의 사용으로 반복률의 제약과 추가적인 방열 장치에 대한 요구가 발생한다. 이러한 이유로 PFL과 MPC 없이 빠른 상승 시간을 실현할 수 있는 순수 반도체 스위치 기반 막스 모듈레이터가 요구되고 있다.

반도체 스위치 기반 막스 모듈레이터가 빠른 상승 시간을 갖는 펄스를 출력하기 위해선 스위칭 특성이 빠른 방전 스위치가 사용되어야 한다. 본 논문에선 빠른 상승 시간을 갖는 반도체 스위치 기반 펄스 모듈레이터에 사용할 방전 스위치 선정에 관한 내용을 다룬다. 방전 스위치의 선정은 다각적인 관점에서 이루어져야 하며 주요 고려 사항은 스위칭 특성, 아크 신뢰성, 가격이 있다. 전력용 반도체 스위치의 스위칭 특성 같은 경우 제조사에서 해당 사양을 나타내고 있지만, 제조사마다 테스트 조건이 달라 데이터시트에 있는 내용만을 기반으로 반도체 스위치들을 비교하기 어렵다. 본 논문에선 비교적 빠른 상승 시간을 가지는 반도체 스위치(SiC-MOSFET, IGBT)들을 후보로 선정하여 비교 분석하였다. 여러 전류 조건에서 반도체 스위치들의 상승 시간을 측정하였고 아크 신뢰성과 가격까지 고려하여 방전 스위치를 선정하였다. 또한, 선정된 방전 스위치를 사용한 10 kV급 펄스 모듈레이터를 다양한 전류 조건에서 구동하였으며, 출력 펄스의 상승 시간이 20ns 이하의 값을 가지는 것을 확인하였다. 이는 친환경 펄스 응용 분야에서 일반적으로 요구하는 50ns 이하의 빠른 상승 시간으로 응용 분야에 효과적으로 적용 가능할 것으로 예상한다.

2. 본 론

2.1 반도체 스위치 기반 막스 모듈레이터의 동작 원리

본 논문에서 다루는 전력용 반도체 스위치를 사용한 막스 모듈레이터는 그림 1과 같은 구조를 가진다. 전력용 반도체 스위치의 전압 정격의 한계를 극복하고 고전압을 출력하기 위해 멀티 스테이지 구조가 사용되었다. 스테이지들이 직렬로 스택되어 펄스 방전부를 이루며, 각 스테이지는 방전 스위치($S_1 - S_N$), 스토리지 커패시터($C_1 - C_N$), 바이패스 다이오드($D_1 - D_N$)로 구성된다.

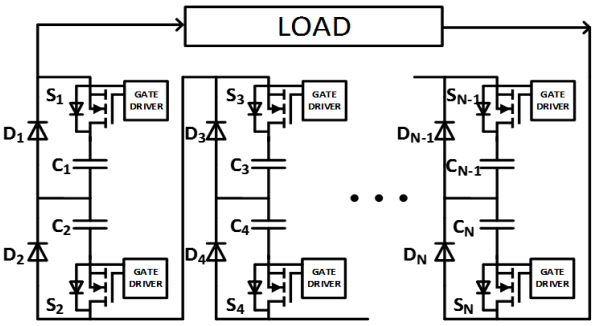


Fig. 1. The structure of the solid-state Marx modulator

반도체 스위치 기반 막스 모듈레이터의 동작 원리를 간략히 설명하면 다음과 같다. 스토리지 커패시터는 커패시터 충전기에 의해 동시에 충전되며, 고주파 스위칭 제어를 통해 충전 전압을 조절한다. 그림 1에서 커패시터 충전기 구조는 복잡성의 이유로 생략하였다. 커패시터 충전기의 충전 동작과 독립적으로 펄스 방전은 방전 스위치의 동기 스위칭에 의해 이루어진다. 한편, 바이패스 다이오드는 일부 스테이지의 동기화 실패 혹은 고장 시에 펄스 전류의 패스를 제공해주는 역할과 방전 스위치의 양단 전압을 스토리지 커패시터 전압으로 클램핑하는 역할을 한다.

막스 모듈레이터의 펄스 상승 시간은 방전 스위치의 스위칭 속도, 동기화, 방전 루프의 기생 성분에 의해 결정된다. 특히, 수십 나노초의 빠른 상승 시간을 가지는 막스 모듈레이터를 구현하기 위해선 방전 스위치

중앙대학교 | IP:165.194.94.*** | Accessed 2022/01/25 14:49(KST)

Table 1. The specification of the candidates for discharge switch

NO.	MODEL	TYPE	V_{DS} or V_{CE}	I_D or I_C
1	FGL40N120AN	IGBT	1200 V	64 A
2	C2M0025120D	Si-C MOSFET	1200 V	90 A
3	C2M0040120D	Si-C MOSFET	1200 V	60 A
4	C3M0065090D	Si-C MOSFET	900 V	36 A
5	C3M0280090D	Si-C MOSFET	900 V	11.5 A

들의 빠른 스위칭 속도와 정확한 동기화 요구된다. 막스 모듈레이터의 펄스 방전은 모든 방전 스위치들이 턴 온 됨에 따라 커패시터가 직렬 연결되어 고전압이 부하에 인가되는 방식으로 이뤄지기 때문에 펄스 상승 시간은 방전 스위치의 동기 턴 온 시 방전 스위치들의 턴 온 속도와 동기화 오차에 의해 결정된다. 따라서 빠른 상승 시간을 가지는 방전 스위치 사용이 필수적이며, 스위치의 턴 온 속도가 빠르고 스테이지 간 동기화 오차가 최소화된 게이트 제어가 필요하다. 이 중 본 논문에선 막스 모듈레이터의 나노초 상승 시간 달성을 위한 방전 스위치의 선정을 다룬다.

2.2 방전 스위치 선정 고려 사항 및 후보 선정

반도체 스위치 기반 막스 모듈레이터의 방전 스위치는 출력 펄스 특성, 신뢰성, 가격에 주요한 영향을 미치기 때문에 이들을 모두 고려하여 다각적인 관점을 가지고 선정하였다.

막스 모듈레이터의 고전압 펄스 생성은 방전 스위치의 턴 온/오프 스위칭에 의해 이뤄지므로 방전 스위치의 특성에 따라 출력 펄스의 특성이 크게 좌우된다. 빠른 상승 시간을 가지는 펄스를 출력하기 위해선 특히 턴 온 특성이 빠른 방전 스위치가 사용되어야 한다. 추가로, 같은 모델의 전력용 반도체 스위치 간에도 존재하는 공정 오차는 펄스 방전 시 방전 스위치들의 동기화 오차를 만들어내기 때문에, 이를 최소화하기 위해 같은 공장에서 생산된 모델을 사용하는 것이 바람직하다.

한편, 나노초 펄스 모듈레이터의 응용 분야 특성상 부하에 아크 발생이 잦기 때문에, 아크에 대한 신뢰성도 펄스 모듈레이터 설계 과정에서 중요하게 고려해야 할 부분이다. 부하에 아크가 발생하면 펄스가 출력되는 동안 아크 전류가 급격하게 증가하게 되는데, 아크 전류의 피크 값이 방전 스위치 피크 전류 내량을 초과하면 스위치의 소손 혹은 수명 저하가 발생한다. 이에따라 스위치 선정 시 피크 전류 내량이 고려되어야 한다. 동일한 연속 정격 전류를 가지는 경우에는 IGBT가 SiC-MOSFET보다 피크 전류 내량이 높다는 사실은 실험을 통해 밝혀져 왔다[10]. 따라서 비슷한 값의 연속 정격 전류 사양을 가지는 IGBT와 SiC-MOSFET을 비교할 경우 IGBT가 아크에 대한 신뢰성이 높다.

반도체 스위치 기반 막스 모듈레이터는 고전압을 출력하기 위해 수십 개 이상의 전력용 반도체 스위치를 사용하기 때문에 스위치의 가격이 펄스 시스템의 전체 비용에서 차지하는 부분은 상당하다. 펄스 모듈레이터의 높은 가격은 상용화에 큰 장애물로서 전력용 반도체 스위치의 가격은 방전 스위치 선정 시에 중요한 요소로 다뤄진다.

반도체 스위치 기반 막스 모듈레이터에선 일반적으로 전압 정격이 900 V 혹은 1200 V인 방전 스위치들이 사용된다[10], [11]. 900 V 미만의 낮은 전압 정격을 가지는 전력용 반도체 스위치를 사용할 경우 같은 전압을 출력하기 위해 더욱 많은 스테이지가 요구되어 소자 수가 증가한다. 또한, 1200 V 보다 높은 전압 정격을 가지는 전력용 반도체 스위치의 경우 스위칭 특성이 느려지거나 비용이 크게 증가하여 일반적으로 채택되지 않는다.

빠른 상승 시간을 구현하기 위하여 빠른 스위칭 특성을 가지는 900 V/ 1200 V 전력용 반도체 스위치들을 후보로 선정하였으며, 비교 분석을 통해 가장 적합한

중앙대학교 | IP:165.194.94.*** | Accessed 2022/01/25 14:49(KST)

방전 스위치를 선정하였다. 후보로 FGL40N120AN, C2M0025120D, C2M0040120D, C2M0065090D, C2M00280090D가 선정되었으며, 표 1에 주요 사양을 나타내었다.

2.3 방전 스위치의 상승 시간 분석을 위한 테스트 회로

전력용 반도체 스위치의 상승 시간에 대한 정보가 제조 업체에서 제공하는 데이터시트에 나와 있으나, 출력 전압/전류, 게이트 전압 인가 방식에 관한 조건이 각각 다르다. 동일 조건에서의 전력용 반도체 스위치들의 상승 시간을 비교하기 위해 테스트 회로를 구축하였다. 상승 시간 분석을 위한 테스트 회로의 전체 구조는 그림 2와 같다. 파워 셀 기반 펄스 모듈레이터의 단일 셀 형태로, 멀티 스테이지 방식과 동일하게 커패시터 충전기에 의해 스토리지 커패시터가 충전되며, 펄스 방전 스위치를 통해 부하에 펄스 형태의 전압을 인가한다. 스토리지 커패시터, 방전 스위치, 부하로 이어지는 펄스 방전 루프와 독립적으로 스토리지 커패시터를 충전하기 위한 LCC 공진형 컨버터 기반 커패시터 충전기가 사용되었다. LCC 공진형 컨버터는 낮은 도전손실 및 스위칭 손실의 장점으로 반도체 스위치 기반 펄스 모듈레이터의 승압용 커패시터 충전기로 널리 사용되고 있으며, 설계 과정은 [12]에 자세히 나와 있다. 테스트 회로에 사용되는 LCC 공진형 컨버터는 다양한 펄스 폭 및 펄스 반복률 조건에서도 방전 스위치의 동작 및 특성을 확인할 수 있도록 충분한 마진을 가지고 설계되었으며, 출력 전압 833 V, 출력 전류 50 A, 펄스 폭 1 uH 조건에서 6 kHz의 펄스 반복까지 동작이 가능한 사양이다. 커패시터 충전기의 사양과 설계 파라미터는 표 2에 나와 있다.

전력용 반도체 스위치의 출력 전압 상승 시간은 반도체 스위치의 고유 스위칭 특성과 출력 전압 전류뿐만 아니라 게이트 입력 신호에도 영향을 받는다. 동일 출력 전압 및 전류 조건에서의 전력용 반도체 스위치들의 출력 상승 시간을 비교 분석하기 위해 동일 범용 게이트 드라이버를 사용하였다. 또한, 순수한 저항 부하에서의 실험 결과를 얻기 위해 RL 시정수에 따른 상승 시간 딜레이를 최소화하기 위해 방전 루프 길이를 최소화하였고 무유도 저항을 사용하였다.

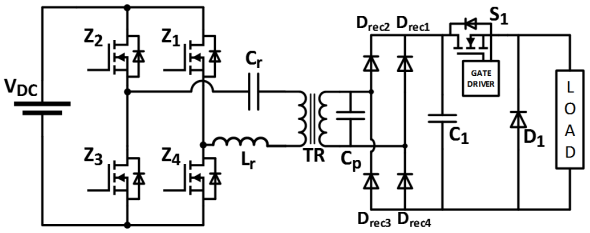


Fig. 2. The test circuit for measuring the rise time of single cell

Table 2. The specification of the single cell test circuit

Power	250 W
Vin	310 V
Vout	830 V
fsw	100-250 kHz
Lr	410 uH
Cr	1 uF
Cp	1.35 nF
Transformer turns ratio	18:24

3. 실험 결과

3.1 방전 스위치 상승 시간 측정 및 선정

나노초 막스 모듈레이터 구현에 적합한 방전 스위치를 선정하기 위해 상승 시간 비교 실험을 수행하였다. 2.2 장에서 선정한 전력용 반도체 스위치들을 대상으로, 2.3 장에서 소개한 테스트회로를 사용하여 반도체 스위치의 상승 시간을 측정하였다. 600 V의 출력 전압 및 10 A, 25 A, 50 A 출력 전류 조건에서 실험을 수행하였으며, 그림 3(a), 그림 3(b), 그림 3(c)는 각각 600 V/ 10 A, 600 V/ 25 A, 600 V/ 50 A 조건에서 전력용 반도체 스위치들의 출력 파형이다. 방전 스위치 상승 시간 측정 실험 결과를 그림 3에 나타내었으며, 정리하여 표 3에 나타내었다.

중앙대학교 | IP:165.194.94.*** | Accessed 2022/01/25 14:49(KST)

Table 3. The rise time comparison of the single cell test

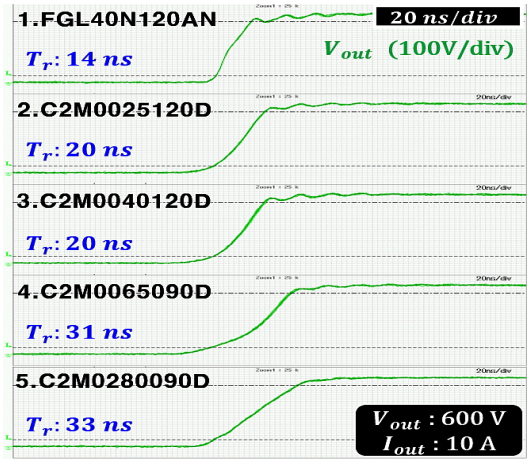
Discharge switch	$T_r(10A)$	$T_r(25A)$	$T_r(50A)$
FGL40N120AN	14 ns	20 ns	46 ns
C2M0025120D	20 ns	22 ns	42 ns
C2M0040120D	20 ns	22 ns	44 ns
C3M0065090D	31 ns	33 ns	51 ns
C3M0280090D	33 ns	39 ns	78 ns

나노초 막스 모듈레이터에 사용할 방전 스위치로 빠른 상승 시간, 높은 신뢰성, 낮은 가격을 가지는 FGL40N120AN(1200V IGBT)가 선정되었다.

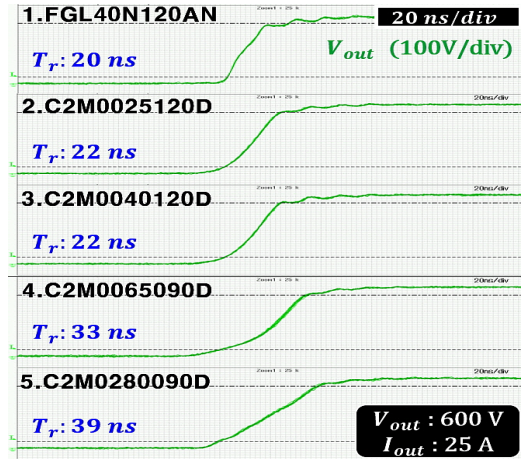
여러 전류 조건에서 반도체 스위치들의 상승 시간을 비교하였다. C2M0065090D와 C2M00280090D는 다른 후보들과 비교하여 10 ns 이상 느린 상승 시간을 가지며, 정격 전압도 900 V로 1200 V에 비해 비교적 낮기 때문에 제외하였다. 한편, FGL40N120AN, C2M0025120D, C2M0040120D의 상승 시간은 10 A와 25 A 조건에선 FGL40N120AN이 각각 14 ns와 20 ns로 가장 빠르며, 50 A 조건에선 C2M0025120D가 42 ns로 가장 빠르다.

아크 발생 시의 높은 피크 전류에 대한 신뢰성을 검토하였다. FGL40N120AN, C2M0025120D, C2M0040120D 세 후보의 연속 정격 전류는 각각 64 A, 90 A, 60 A 이다. SiC-MOSFET인 C2M0025120D와 C2M0040120D의 경우 연속 정격 전류의 3 배 이상의 펄스 전류 출력이 어려우나, FGL40N120AN의 경우 연속 정격 전류의 6배가 넘는 400 A의 피크 전류에서도 소손없이 동작함을 실험적으로 검증하였다[13]. 부하에 아크 발생이 잦은 나노초 펄스 모듈레이터의 응용분야를 고려하였을 때, 방전 스위치로 FGL40N120AN를 사용하는 것이 신뢰성 측면에서 유리하다.

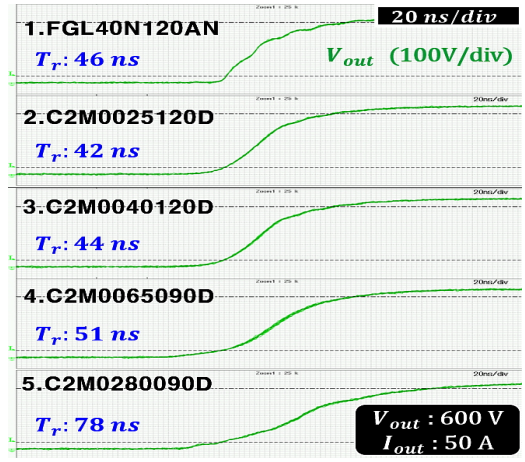
반도체 스위치들의 가격을 비교하였다. FGL40N120AN의 가격을 기준으로 C2M0025120D은 962%, C2M0040120D는 475%의 가격을 가진다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. The experimental results of single cell test. (a) 600 V/ 10 A. (b) 600 V/ 25 A. (c) 600 V/ 50 A

중앙대학교 | IP:165.194.94.*** | Accessed 2022/01/25 14:49(KST)

3.2 선정된 방전 스위치를 적용한 10 kV 급 막스 모듈레이터의 펄스 출력 실험

상승 시간, 피크 전류 내량, 가격을 종합적으로 비교하여 FGL40N120AN(1200V IGBT)를 10 kV급 막스 모듈레이터의 방전 스위치로 선정하였으며, 펄스 출력 실험을 수행하였다. 이 막스 모듈레이터에는 방전 스위치들의 빠른 스위칭과 정확한 동기화 구현에 최적화된 게이트 구동 시스템이 사용되었으며 12개의 방전 스위치가 사용되었다. 표 4에 막스 모듈레이터의 사양을 정리하였다.

그림 4는 출력 전압 10 kV, 출력 전류 10 A/20 A/40 A/60 A/80 A 조건에서의 펄스 출력 파형을 보여준다. 모든 출력 전류 조건에서 20ns 이하의 빠른 상승 시간을 확인할 수 있다.

Table 4. The specification of the 10-kV Marx modulator

Pulse discharge switch	FGL40N120AN
Output voltage	0-10 kV
Output current	0 - 80 A
Pulse repetition rate	~ 50,000 pulses/s

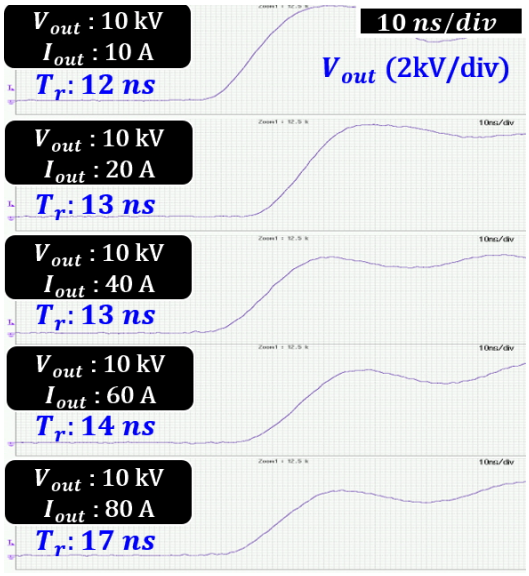


Fig. 4. The experimental results of 10-kV pulses test

4. 결 론

본 논문에선 빠른 상승 시간을 갖는 펄스 모듈레이터를 구현하기 위한 방전 스위치를 비교 분석하였다. 반도체 스위치 기반 펄스 시스템들에 사용되어 신뢰성이 검증되었으며 빠른 스위칭 특성을 가지는 전력용 반도체 스위치들을 후보로 선정하여 상승 시간, 아크 전류 내량, 비용을 중심으로 비교하였다. 특히 동일한 조건에서의 상승 시간을 비교하기 위해 동일한 게이트 구동 회로와 펄스 방전부를 사용하여 상승 시간을 측정 및 비교하였다. 비교적 빠른 상승 시간, 수백 A의 높은 피크 전류 내량, 비교적 저렴한 가격으로 FGL40N120AN(1200V IGBT)가 방전 스위치로 선정되었다. 선정한 방전 스위치를 10 kV 펄스 모듈레이터에 적용해 고전압 펄스 출력 실험을 수행하였으며, 방전 스위치의 정격 전류 이하의 모든 전류 조건에서 20ns 이하의 빠른 상승 시간을 확인하였다.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIP) (No.NRF2020R1A2C2099663) and supported by the project titled as Development of DC Arc Interruption Technology and Performance Evaluation Facility for Medium and Large PV System Development (NO. 20192910100090) granted by Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP), Ministry of Trade, Industry and Energy, Korea.

References

[1] 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 Trans. Plasma Sci., vol. 47, no. 10, pp. 4466-4472, Oct. 2019.

[2] S. H. Song, H. B. Jo., and H. J. Ryoo, "Study on the High-Voltage Solid-State Pulsed-Power Modulator for Parallel Reactor Operation," IEEE Trans. Plasma Sci., vol.

중앙대학교 | IP:165.194.94.*** | Accessed 2022/01/25 14:49(KST)

47, no. 10, pp. 4495-4499, Oct. 2019.
[3] A. Chowdhury, S. P. Nayak, A. K. Saxena, M. D. Kale., and T. C. Kaushik, "Ignitron-based switching scheme for multiple ignitron triggering in pulsed power applications," IEEE Trans. Plasma Sci, vol. 45, no. 12, pp. 3258 - 3264, Dec. 2017.
[4] J. Urban and K. Frank, "Cold Cathode Thyratron Development for Pulsed Power", 25th Intern. Power Modulator Conf. and HighVoltage Workshop, Hollywood, USA, pp. 217-220, 2002.
[5] C. Y. Liu, C. G. Cho, S. H. Song., and H. J. Ryoo, "A Low Cost, Fast-Rising, High-Voltage Pulsed Power Modulator Based on a Discontinuous Conduction Mode Flyback Converter," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 48, no. 12, pp. 4387-4393, Dec. 2020.
[6] 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 Trans. Power Electron., vol. 33, no. 12, pp. 10654-10662, Dec. 2018.
[7] H. Li, H. Ryoo, J. Kim, G. Rim, Y. Kim., and J. Deng, "Development of Rectangle-Pulse Marx Generator Based on PFN," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 37, no. 1, pp. 190-194, Jan. 2009.
[8] S. R. Jang, G. H. Rim, C. G. Cho, S. H. Song, S. M. Park., and H. J. Ryoo, "A 120-kV, 5-kA Multipurpose Pulsed-Power Generator Using a Semiconductor Switch and Magnetic Pulse Compression," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 45, no. 10, pp. 2678-2682, Oct. 2017.
[9] J. Rao, K. Liu., and J. Qiu, "All solid-state nanosecond pulsed generators based on Marx and magnetic switches," IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul., vol. 20, no. 4, pp. 1123-1128, Aug.6 2013.
[10] S. Jang, H. Ryoo, G. Goussev., and G. H. Rim, "Comparative Study of MOSFET and IGBT for High Repetitive Pulsed Power Modulators," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 40, no. 10, pp. 2561-2568, Oct. 2012.
[11] S. Jang, C. Yu., and H. Ryoo, "Simplified Design of a Solid State Pulsed Power Modulator Based on Power Cell Structure," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 65, no. 3, pp. 2112-2121, March 2018.
[12] S. Jang, C. Yu., and H. Ryoo, "Trapezoidal Approximation of LCC Resonant Converter and Design of a Multistage Capacitor Charger for a Solid-State Marx Modulator," IEEE Trans. Power Electron., vol. 33, no. 5, pp. 3816-3825, May 2018.
[13] S. Park, S. Song, H. Jo, W. Jeong, S. R. Jang., and H. Ryoo, "Solid-State Pulsed Power Modulator for 9.3 GHz, 1.7 MW X-Band Magnetron," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 68, no. 2, pp. 1148-1154, Feb. 2021.

Biography



Seung-Hee Lee

He received the B.S. and M.S. degrees in energy systems engineering from Chung-Ang University, Seoul, South Korea, in 2019 and 2021. Since 2021, he has been with the Korea Electrotechnology Research Institute (KERI), Ansan, South Korea, as an Engineer in the High Voltage Evaluation Division. His research interest is a high voltage pulsed power generator.



Seung-Ho Song

He received his B.S. degree in electrical engineering from the Kwang-Woon University, Seoul, South Korea, in 2016. He is currently pursuing his M.S. and Ph.D. degrees at the Department of Energy Engineering, Chung-Ang University, Seoul. His current research interests include soft-switched resonant converter applications and high-voltage pulsed-power supply systems.



Hong-Je Ryoo

He received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees in electrical engineering from Sungkyunkwan University, Seoul, South Korea, in 1991, 1995, and 2001, respectively. From 2004 to 2005, he was a Visiting Scholar with WEMPEC, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA. From 1996 to 2015, he joined the Electric Propulsion Research Division as a Principal Research Engineer, the Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon, South Korea, where he was a Leader with the Pulsed Power World Class Laboratory, a director of Electric Propulsion Research Center. From 2005 to 2015, he was a Professor with the Department of Energy Conversion Technology, University of Science and Technology, Deajeon, South Korea. In 2015, he joined the School of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University, Seoul, where he is currently a Professor. His current research interests include pulsed-power systems and their applications, as well as high-power and high-voltage conversions. Prof. Ryoo is an Academic Director of the Korean Institute of Power Electronics, an International Cooperation Director of the Korean Institute of Electrical Engineers, and the Vice President of the Korean Institute of Illuminations and Electrical Installation Engineers.

중앙대학교 | IP:165.194.94.*** | Accessed 2022/01/25 14:49(KST)