DBpia

고전압 양극성 펄스 파워 모듈레이터를 위한 게이트 직렬 구동에 대한 연구

A Study on the Series Gate Driving for High Voltage Bipolar Pulsed Power Modulator

저자
(Authors)

송승호, 이승희, 류홍제
Seung-Ho Song, Seung-Hee Lee, Hong-Je Ryoo

출처
(Source)

조명·전기설비학회논문지 34(4), 2020.4, 31-37(7 pages)
Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers 34(4), 2020.4, 31-37(7 pages)

발행처
(Publisher)

한국조명·전기설비학회
The Korean Institute of Illuminating and electrical Installation Engineers

URL

http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE09329504

APA Style

송승호, 이승희, 류홍제 (2020). 고전압 양극성 펄스 파워 모듈레이터를 위한 게이트 직렬 구동에 대한 연구. 조명·전기설비학회논문지, 34(4), 31-37

이용정보
(Accessed)

중앙대학교
165.***.103.27
2020/07/28 15:46 (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 (2020) 34(4) : 31～37
http://doi.org/10.5207/JIEIE.2020.34.4.031 ISSN 1229-4691(Print) ISSN 2287-5034(Online)

논문 34-4-5

고전압 양극성 펄스 파워 모듈레이터를 위한 게이트 직렬 구동에 대한 연구

(A Study on the Series Gate Driving for High Voltage Bipolar Pulsed Power Modulator)

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

Abstract

This paper presents the study of the gate circuit of the bipolar pulsed power modulator. In order to output a high voltage bipolar pulse, the modulator has a modular structure in which a full bridge sub-modules are stacked in series. The gate circuit is designed to operate the discharge switch of the sub-module through a simple structure. The entire gate circuit is driven by a signal from a pair of control loops connected through a transformer. The operation of the designed gate circuit is divided into four operating modes according to the input signal and analyzed in detail. The gate signals according to the change of circuit parameters are confirmed by a result of PSpice-based simulation modeling. Testing circuit consisting of top and bottom switches are implemented, and the basic operation is verified by gate drive experiments.

Key Words : Bipolar Pulse, Gate Driver, Modular Structure, Pulsed Power Modulator

1. 서 론

고전압 펄스 파워 모듈레이터는 의료, 농업, 살균, 가스처리 등 여러 응용분야에 사용되며 일부 의료 및 살균 응용분야에서는 기존 단 극성 펄스 인가 조건과 비교하여 양극성 펄스의 인가 시 더욱 높은 처리 효과가 달성되었다[1-7].

한편 반도체 소자 기반의 펄스 파워 모듈레이터는 펄스 전압, 폭의 제어가 용이하며 높은 반복률의 구동이 가능한 장점이 있지만 반도체 소자의 정격 전압의 한계점을 가진다. 이를 극복하기 위해 반도체 스위치를 직렬로 연결하여 다수 개의 스위치로 고전압 펄스를 출력하기 위한 구조들이 제안되었다[8-10]. 이러한 직렬 구동 시에는 반도체 소자에 전압 정격의 초과로 인한 소손의 방지를 위해서 각 반도체 스위치들 사이의 전압 밸런싱이 요구된다. 이를 위해서는 게이트 구동의 동기화를 만족시키거나 스너버 회로를 사용하여 추가로 전압 밸런싱을 보정하는 방안 또한 고려될 수

† Corresponding Author : Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Korea
* Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Korea
** Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Korea
Tel : 02-820-5178, Fax : 02-3280-5867
E-mail : hjryoo@cau.ac.kr
Received : 2019. 12. 26. / Revised : 2019. 12. 30.
Accepted : 2020. 1. 22.

Copyright ⓒ 2020 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.***.103.27 | Accessed 2020/07/28 15:46(KST)

있다.

이러한 문제점을 해결하여 반도체 기반 펄스 모듈레이터의 신뢰성을 높이기 위한 시도로 파워셀 기반의 펄스 파워 모듈레이터가 제안되었다[11-14]. 스위치, 커패시터, 바이패스 다이오드로 하나의 파워셀이 구성되며 스위치의 동기가 맞지 않더라도 바이패스 다이오드에 의하여 방전 스위치는 정격 전압 이하의 값을 가지는 하나의 커패시터 전압만이 인가되기 때문에 각 스위치 간의 전압 밸런싱에 대한 고려사항이 요구되지 않는다. 하지만 출력 펄스의 빠른 상승시간 및 균일한 펄스 출력을 위해서는 여전히 게이트 동작의 동기화가 중요하며 이를 위해 파워셀 기반의 펄스 모듈레이터에는 직렬 구동방식의 게이트 회로의 사용으로 이를 만족시켰다[13-15].

직렬 구동방식의 게이트 회로는 하나의 컨트롤 인버터를 사용하여 수십 개에 달하는 전체 방전 스위치를 구동하며 게이트 회로에 요구되는 동기화의 만족뿐만 아니라 절연된 신호 및 전력의 공급을 모두 만족 가능한 것이 특징이다. 또한 고전압 케이블과 각 게이트 회로의 소형 변압기를 통해 신호를 전달하는 구조로 고전압 절연을 효과적으로 만족 가능하다[14]. 제안된 게이트 회로는 파워셀 기반의 단 극성 펄스 파워 모듈레이터에 적용되었으며 추가로 능동 풀-다운 기능의 펄스 파워 모듈레이터에 확장 적용되었다[16].

본 논문은 양극성 펄스 파워 모듈레이터에 적용하기 위한 새로운 직렬 구동방식의 게이트 회로 설계 및 분석을 다룬다. 게이트 회로는 풀-브리지 형태를 가지는 서브 모듈의 방전 스위치를 제어하며 각 게이트 회로는 고전압 케이블로 구성된 컨트롤 루프를 통해 동기화된 신호를 공급받는다. 각 스위칭 레그의 상단 및 하단 스위치는 동일한 신호를 입력받아 서로 상보적으로 동작하며 이를 위해 일정한 데드타임을 가지고 동작된다. 입력 신호에 따른 게이트 회로의 동작 모드가 분석되었으며 회로의 파라미터 변경에 따른 데드타임 변화가 시뮬레이션 결과를 통해 확인되었다. 최종적으로 상단 및 하단 스위치로 구성된 테스트 회로가 구현되었으며 게이트 구동 실험을 통해 데드타임을 가지는 회로의 기본적인 구동이 확인되었다.

2. 회로 설계 및 동작 모드 분석

2.1 게이트 회로 설계

직렬구동 게이트 회로를 가지는 양극성 펄스 모듈레이터의 구조를 그림 1에 나타내었다. 양극성 신호를 생성하기 위한 각 서브 모듈이 직렬로 연결되어 고전압을 생성하며 풀-브리지 구조의 방전 스위치를 제어하여 양극(+) 및 음극(-) 펄스를 출력한다. 풀-브리지 좌, 우측 레그의 스위치는 각각 컨트롤 루프 1, 2에 의해 제어되고 각각 스위치 1, 4와 2, 3과 연결되어 게이트 회로에 신호를 전달한다. 각 컨트롤 루프에 양극(+)의 신호가 인가되면 커패시터의 양극(+) 단 스위치(SW1, 2)가 켜지며 음극(-)의 신호가 인가되면 반대측 스위치(SW3, 4)가 켜진다. 각 컨트롤 루프의 신호에 의한 모듈레이터의 동작을 표 1에 나타내었으며 0 출력은 상단 또는 하단 스위치를 통해 출력 단이 단락 되는 능동 풀-다운 동작으로 고전압 펄스에 의해 충전된 부하 측 전하를 방전하여 펄스 출력의 하강시간을 감소시키기 위해 사용된다.

각 컨트롤 루프에 의해 제어되는 게이트 드라이버의 회로도 및 설계 파라미터를 그림 2와 표 2에 나타내었다. 게이트 회로는 컨트롤 루프와 좌측의 변압기(TR)를 통해 연결되어 변압기를 통해 컨트롤 루프의 신호가 입력되며 입력된 신호는 메인 스위치를 켜거나 끄는 동작을 수행한다. 게이트 회로의 구동에 필요한 전력은 좌측 하단의 스토리지 커패시터(C1)에 저장된 에너지를 사용하며 스토리지 커패시터는 각 동작 모드에 따라 충전 및 방전을 반복한다. 스토리지 커패시터(C1)에는 47μF의 정전 용량을 갖는 전해 커패시터가 사용되어 전압의 맥동 값이 최소화되어 균일한 게이트 전압이 인가된다.

2.2 동작 모드 분석

게이트 회로의 입력신호 및 스위칭 소자의 구동에 따른 동작 모드는 총 4가지로 나뉘며 이를 그림 3에 나타내었다. 동작 모드는 턴-온 딜레이 모드, 턴-온

중앙대학교 | IP:165.***.103.27 | Accessed 2020/07/28 15:46(KST)

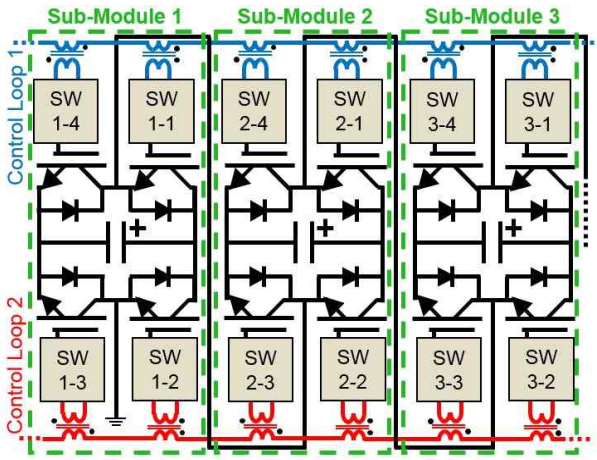

Fig. 1. Structure of the bipolar pulsed power modulator with series driving gate circuit

Table 1. Switching operation and pulse output according to driving signal from control loops

Control loop 1	+	+	−	−
SW 1	ON	ON	OFF	OFF
SW 4	OFF	OFF	ON	ON
Control loop 2	+	−	+	−
SW 2	ON	OFF	ON	OFF
SW 3	OFF	ON	OFF	ON
Pulse output	0	+	−	0

모드, 턴-온 홀드 모드, 턴-오프 모드가 있으며 각 동작 모드 분석은 다음과 같다.

모드 1(턴-온 딜레이 모드): 모드 1은 게이트 회로에 TR을 통해 양극(+)의 신호가 입력되면서 시작된다. 입력된 신호는 정류 다이오드(D2, D8)를 도통 시키며 스토리지 커패시터(C1)를 충전하며 충전 전압은 제너다이오드(D1)의 제너 전압에 의해 제안된다. 입력 전류는 저항 R2 양단에 전압강하로 인한 전위차를 발생시키며 입력 전류에 비례하여 점점 증가된다. 저항 R2 양단 전압이 Q2의 베이스-이미터의 문턱전압 이상이 되어 Q2가 턴-온 되면 모드 2로 동작된다.

모드 1은 R2의 값에 따라 지속시간이 변화되며 R2 값이 클수록 입력 전류 값에 의한 전압 강하가

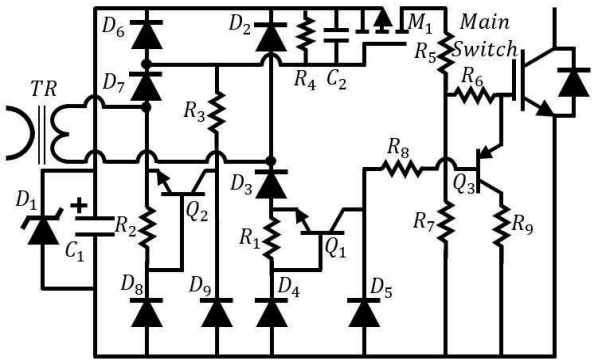

Fig. 2. Schematic diagram of the gate driver for bipolar pulsed power modulator

Table 2. Design parameters of the gate driver

Design Parameter	Value
Main Switch	FGL40N120 1200V/40A IGBT
M_1	NTR4101PT -20V/-1.7A MOSFET
$Q_{1,2}$	MMBT489 30V/1A BJT
Q_3	NSS20200LT1G -20V/-2A BJT
D_1	BZV55-18 18V/0.5W Zener Diode
D_{2-9}	NSR1020MW 20V/1A Diode
C_1	35V/47μF

크게 일어나므로 모드1의 지속시간이 감소된다. 이를 통해 게이트 회로의 턴-온 동작 시점의 변경이 가능하다.

모드 2(턴-온 모드): 모드 2는 저항 R2 양단의 전위차에 의해 트랜지스터 Q2가 켜지면서 시작되며 작은 값의 저항 R3을 통하여 커패시터 C2를 빠르게 음극(-)으로 충전시킨다. 커패시터 C2는 모스펫 M1의 게이트-소스와 병렬로 연결되어 있으므로 커패시터 C2의 전압이 모스펫 M1의 문턱전압을 넘게 되면 M1이 켜지고 저항 R5, R6을 통해 메인 스위치가 턴-온 된다. 저항 R3은 매우 작은 값을 가지므로 모스펫 M1은

중앙대학교 | IP:165.***.103.27 | Accessed 2020/07/28 15:46(KST)

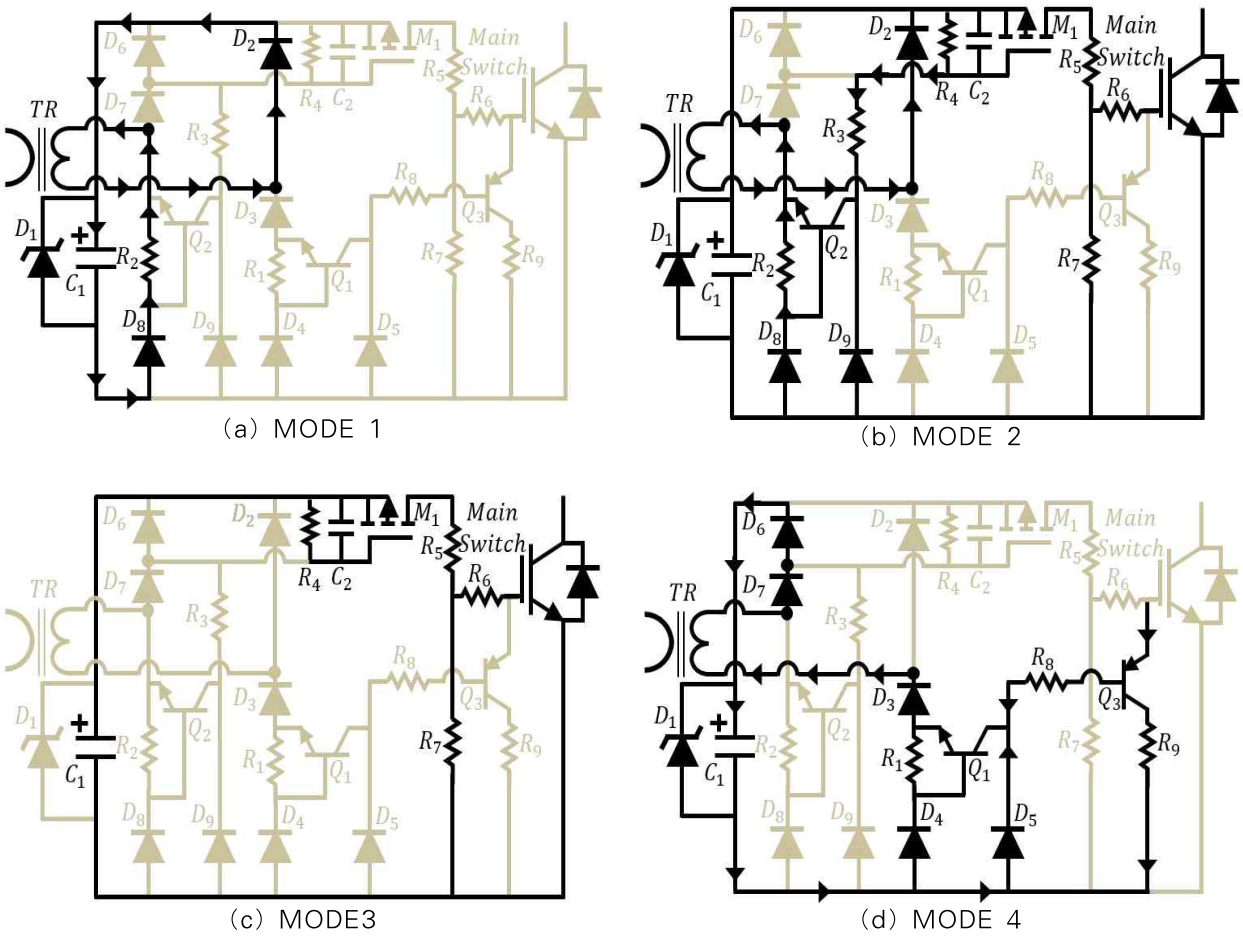

Fig. 3. Operating modes of the gate driver

트랜지스터 Q2가 턴-온 됨과 거의 동시에 턴-온 된다. 모드 2에서도 스토리지 커패시터 C1은 여전히 입력 전류에 의해 충전된다.

모드 3(턴-온 유지 모드): 모드 3은 양극(+)의 입력신호가 0이 되면서 시작된다. 입력 전류가 없으므로 스토리지 커패시터 C1은 충전되지 않으며 저항 R2에 전압강하가 없으므로 트랜지스터 Q2 또한 턴-오프 된다. 모스펫 M1은 커패시터 C2에 충전된 전압에 의해 턴-온이 유지되며 메인 스위치의 게이트 단에 전압을 지속적으로 인가한다. 저항 R4는 비교적 큰 값을 가지므로 커패시터 C2의 방전은 매우 느리게 진행되므로 모드 3 또한 비교적 긴 시간 동안 지속된다.

모드 4(턴-오프 모드): 모드 4는 변압기(TR)를 통해 음극(-)의 신호가 입력되면서 시작된다. 입력 신호에 의하여 정류 다이오드(D3, 4, 6, 7)가 도통되고 스토리지 커패시터(C1)를 충전한다. 다이오드 D6과 병렬로 연결된 커패시터(C2)는 빠르게 방전되고 모스펫 (M1)의 게이트-이미터 전압 또한 빠르게 감소되므로 모스펫(M1)은 턴-오프 된다. 입력된 전류는 저항 R1을 통과하며 전압강하를 발생시키고 트랜지스터 Q1을 턴-온 시킨다. 저항 R1의 값은 비교적 큰 값을 가지므로 신호가 입력됨과 거의 동시에 트랜지스터 Q1이 켜지게 되고 저항 R8을 통해 트랜지스터 Q3에 베이스 전류를 공급하고 트랜지스터 Q3이 턴-온 되면서 저항 R9를 통하여

중앙대학교 | IP:165.***.103.27 | Accessed 2020/07/28 15:46(KST)

메인 스위치의 게이트 전하가 빠르게 방전되며 턴-오프 된다.

3. 시뮬레이션 및 실험결과

3.1 시뮬레이션 결과

설계된 게이트 회로의 동작 검증을 위해 PSpice 시뮬레이션 모델링이 수행되었으며 이를 그림 4에 나타내었다. 모델링 된 회로는 풀-브리지의 상단 및 하단 스위치 게이트 회로이며 하나의 컨트롤 루프가 각 회로에 입력 신호를 인가하며 게이트를 구동시킨다. 입력 신호에 따른 게이트 회로의 시뮬레이션 결과를 그림 5에 나타내었으며 저항 R2 값에 따른 턴-온 딜레이 모드 구간의 최적화를 통해 상단 및 하단 스위치의 데드타임이 확보되어 단락이 발생되지 않았으며 게이트 회로는 설계된 동작 모드에 따라 정상 동작하였다. 게이트 회로는 직렬 구동 회로의 특성으로 입력 전압에 의한 전류의 극성에 따라 각 회로들이 동작되는 것이 되었다.

그림 6은 저항 R2 값 변경에 따른 턴-온 딜레이 구간 가변 조건의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 저항 R2 값이 8, 6, 4Ω으로 변화됨에 따라 턴-온 시점이 변화됨이 확인되었으며 게이트 전압 값이나 턴-오프 동작에는 영향을 주지 않는 것이 확인되었다.

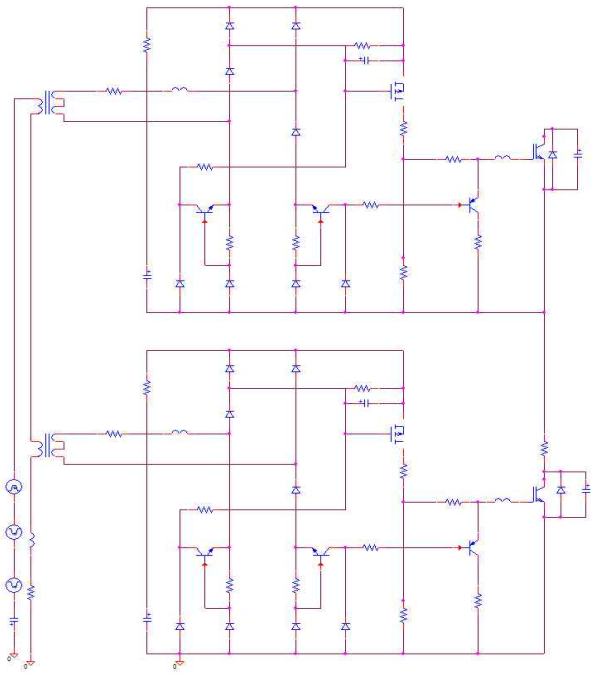

Fig. 4. Simulation modeling of half-bridge circuit with gate driver for bipolar pulsed power modulator

3.2 실험결과

본 논문의 게이트 회로설계 및 시뮬레이션 결과를 바탕으로 게이트 회로의 구동을 검증하기 위한 테스트 회로가 구현되었다. 회로는 하프 브릿지 구조로 구성되어 동일 입력 신호에 대한 상단 및 하단 게이트 회로의 동작의 시험이 가능하도록 구현되었다. 실험은 게이트 회로에 신호를 입력하였을 때의 상단 측 스위치와 하단 측 스위치의 게이트 전압을 각각 측정하였으며 이를 그림 7에 나타내었다. 실험 조건은 게이트 폭 3μs의 신호를 인가하였으며 턴-온 딜레이 동작을 통한 충분한 데드타임의 확보를 통해 하단 스위치가 완전히 턴-오프 된 이후 상단 스위치가 턴-온 되며 동작하는 것이 확인되었다. 하단 스위치와 상단 스위치의 게이트 전압은 각각 17.5V와 16.0V로 측정되었으며 상단 스위치의 게이트 신호의 지속시간이 길어 스토리지 커패시터가 방전되어 1.5V의 차이가 발생된 것으로 확인되었다.

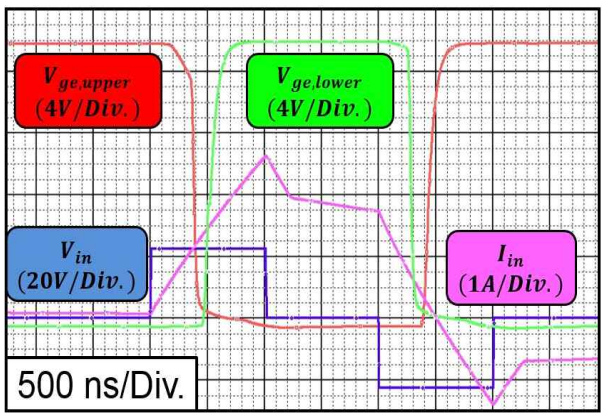

Fig. 5. Simulation waveform of gate circuits according to driving signal

중앙대학교 | IP:165.***.103.27 | Accessed 2020/07/28 15:46(KST)

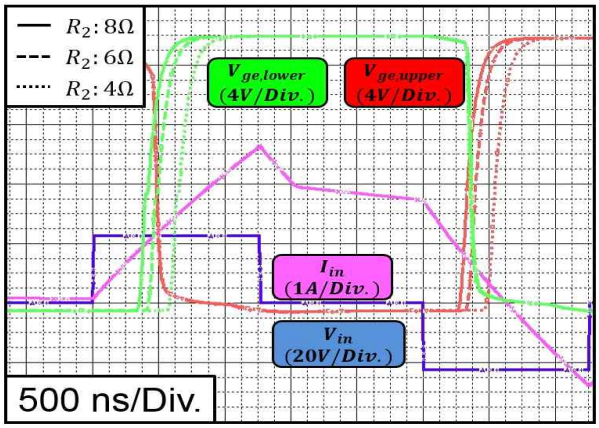

Fig. 6. Simulation waveforms of gate circuits under dead time variable conditions

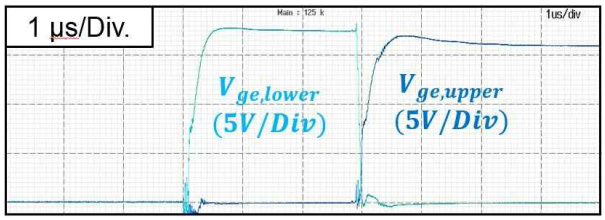

Fig. 7. Experimental result of gate signals

4. 결 론

본 논문은 양극성 펄스 모듈레이터의 방전 스위치 제어를 위한 직렬 구동 방식의 게이트 회로 설계에 대하여 다루었으며 그 효용성을 실험을 통하여 검증하였다. 게이트 회로는 스위칭 레그의 단락 방지를 위한 턴-온 딜레이 모드를 포함한 4개의 동작 모드로 구동되고 동작 지연시간은 회로의 파라미터 변경을 통해 조절이 가능하다. 저항 값의 변화에 따른 턴-온 시점의 변화 및 게이트 회로의 기본동작을 PSpice 기반의 시뮬레이션 모델링을 통해 검증하였으며 시뮬레이션 결과를 바탕으로 하프 브리지 형태의 테스트용 게이트 회로가 구현되었다. 구동 테스트를 통하여 동일한 신호를 입력받는 직렬 구동에 따른 상단 및 하단 게이트 회로의 정상 동작이 확인되었다. 설계된 게이트 회로를 바탕으로 추후 양극성 서브 모듈을 구성하여 고전압 양극성 펄스 발생에 대한 연구가 진행될 계획이다.

Acknowledgement

이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No.NRF-2017R1A2B3004855)

References

[1] Akiyama, H., Sakugawa, T., Namihira, T., Takaki, K., Minamitani, Y. and Shimomura, N., "Industrial Applications of Pulsed Power Technology," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 14, no. 5, pp. 1051-1064, 2007.

[2] Jin, H. S., Song, S. H., Cho, C. G., Park, S. M. and Ryoo, H. J., "Study of Exhaust Air Treatment From a Ship Building Factory Painting Facility Using Pulse Plasma Technology," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 46, no. 10, pp. 3552-3556, 2018.

[3] Song, S. H., Jo, H. B., and Ryoo, H. J., "Study on the High-Voltage Solid-State Pulsed-Power Modulator for Parallel Reactor Operation," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 47, no. 10, pp. 4495-4499, 2019.

[4] Arena, C. B., Sano, M. B., Rossmeisl, J. H., Caldwell, J. L., Garcia, P. A., Rylander, M. N., and Davalos, R. V., "High-frequency Irreversible Electroporation (H-FIRE) for Non-thermal Ablation without Muscle Contraction," Biomedical engineering online, vol. 10, pp. 102, 2011.

[5] Arena, C. B., Sano, M. B., Rylander, M. N., and Davalos, R. V., "Theoretical Considerations of Tissue Electroporation with High-frequency Bipolar Pulses," IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 58, no. 5, pp. 1474-1482, 2011.

[6] Qin, B. L., Zhang, Q., Barbosa-Canovas, G. V., Swanson, B. G., and Pedrow, P. D., "Inactivation of Microorganisms by Pulsed Electric Fields of Different Voltage Waveforms," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 1, no. 6, pp. 1047-1057, 1994.

[7] Wu, T. F., Tseng, S. Y., and Hung, J. C., "Generation of Pulsed Electric Fields for Processing Microbes," IEEE transactions on plasma science, vol. 32, no. 4, pp. 1551-1562, 2004.

[8] Kim, J. H., Park, C. G., Ryoo, M. H., Shenderey, S., Kim, J. S., and Rim, G. H., "IGBT Stacks Based Pulse Power Generator for PIII&D," in Proc. IEEE Pulsed Power Conf., pp. 1065 - 1068, 2005.

[9] Kim, J. H., Ryo, M. H., Min, B. D., and Rim, G. H., "200KV Pulse Power Supply Implementation," in Proc. Eur. Conf. Power Electron, pp. 1 - 5, 2007

[10] Baek, J. W., Yoo, D. W., Rim, G. H., and Lai, J. S., "Solid State Marx Generator using Series-connected IGBTs," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 33, no. 4, pp. 1198 - 1204, 2005.

[11] Jang, S. R., Ryoo, H. J., and Goussev, G., "Compact and High Repetitive Pulsed Power Modulator Based on

중앙대학교 | IP:165.***.103.27 | Accessed 2020/07/28 15:46(KST)

Semiconductor Switches." IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 18, no. 4, pp. 1242-1249, 2011.
[12] Jang, S. R., Ryoo, H. J., Goussev, G., and Rim, G. H., "Comparative Study of MOSFET and IGBT for High Repetitive Pulsed Power Modulators," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 40, no. 10, pp. 2561-2568, 2012.
[13] Ok, S. B., Ryoo, H. J., Jang, S. R., Ahn, S. H., and Goussev, G., "Design of a High-efficiency 40-kV, 150-A, 3-kHz Solid-state Pulsed Power Modulator," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 40, no. 10, pp. 2569-2577, 2012.
[14] Ahn, S. H., Ryoo, H. J., Gong, J. W., and Jang, S. R., "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, 2015.
[15] Ryoo, H. J., Kim, J. S., Rim, G. H., and Goussev, G., "Current Loop Gate Driver Circuit for Pulsed Power Supply based on Semiconductor Switches," in 2007 IEEE 34th International Conference on Plasma Science(ICOPS), vol. 34, pp. 943, 2017.
[16] Yu, C. H., Jang, S. R., Kim, H. S., and Ryoo, H. J., "Gate Driving Circuit With Active Pull-Down Function for a Solid-State Pulsed Power Modulator," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 1, pp. 240-247, 2018.

Biography



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.



Seung-Hee Lee

He received the B.S. degree in energy systems engineering from Chung-Ang University, Seoul, South Korea, in 2017, where he is currently working toward the M.S. degree with the Department of Energy Engineering. His research interests include high efficiency resonant converters and solid-state high voltage pulsed power modulators.



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, a planning director & editorial 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.***.103.27 | Accessed 2020/07/28 15:46(KST)