

광 스위칭 소자를 사용한 전력반도체 응답 지연 및 스위칭 특성 비교 분석

한승훈, 장푸름, 황대연, 주동명, 박준성
한국전자기술연구원 전력제어시스템연구센터

Comparative Analysis of Response Delay and Switching Characteristics of Power Semiconductor Using Optical Switching Devices

Seung Hun Han, Poo Reum Jang, Dae Yeon Hwang, Dongmyoung Joo, Joon Sung Park
Power System Research Center, Korea Electronics Technology Institute

ABSTRACT

본 논문은 전력반도체의 게이트 신호 전달을 위한 광 스위칭 소자와 라인드라이버 소자 간 응답 지연 및 노이즈 특성 비교를 위한 통합형 광 게이트 보드를 제작하고 비교 실험을 수행한다. 실험을 위한 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) 모듈을 선정하여 PWM(Pulse width modulation) 신호의 게이트 보드 간 응답 지연 및 노이즈 특성을 확인하고, DPT(Double Pulse Test)를 통한 스위칭 특성으로 응답성과 노이즈 저항성을 비교 검증한다.

1. 서 론

최근 대역폭 통신 시스템 및 대용량 데이터 전송 기술의 필요성이 높아 짐에 따라 광 스위칭 소자(Optical switching element)를 이용한 송 수신 기술은 광 통신, 기기 제어, 전력 변환 등 다양한 분야에서 그 활용성은 중요해지고 있다. 광 스위칭 소자는 전기 신호를 광신호로 변환하여 전송함으로써 높은 대역폭과 빠른 응답 속도, 전기적 노이즈의 영향이 적은 특성으로 대용량 전력반도체의 안정적인 스위칭을 위해 게이트 드라이버에 활용되고 있다.[1] 통합형 광 게이트 보드 제작을 통해 기존 게이트 보드를 적용 시 발생하는 응답 지연 문제와 노이즈 발생 문제를 개선하고 광 스위칭 소자와 모듈 간 빠른 응답성과 노이즈 저항성을 검증하기 위한 개선 보드를 제작해 광 스위칭 소자의 응답 우수성과 안정적인 전력반도체의 스위칭 동작을 확인한다.[2] 본 논문에서는 PWM 신호와 DPT를 이용한 스위칭 특성 파형 비교를 통해 응답성 및 노이즈 비교 실험을 진행하고 타당성을 검증한다.

위 그림 1 와 같이 기존의 제어 보드-광 증계 보드-게이트 보드 경우 광신호를 받아 라인드라이버 소자를 거치게 되며 광신호 처리 과정에서 발생하는 응답 지연과 스위칭 노이즈 문제가 발생한다. 이를 개선하고자 증계 보드와 게이트 보드를 통합한 통합 광 게이트 보드를 개발하여 제어 보드-통합 광 게이트 보드로 경로를 최소화하며 제어 보드에서 게이트 보드로 광신호를 게이트 드라이버로 직접 연결해 전달 효율성을 높이고 PCB 개선을 진행하였고 제작한 보드는 그림 2 와 같다.

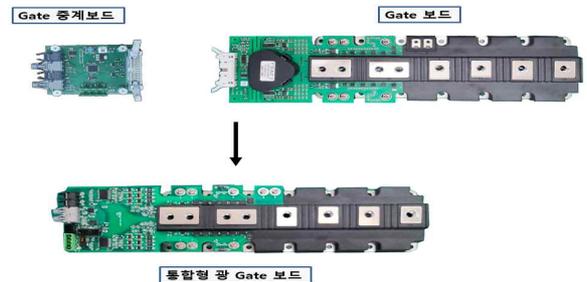


그림 2 통합형 광 게이트 보드 제작
Fig. 2 Fabrication of integrated optical gate boards

동일한 조건에서 비교를 위해 게이트 보드 간의 모듈 스위칭 특성에 영향을 주는 게이트 Turn-On/Off 저항($R_{ON/OFF}$)은 같은 저항값으로 설정하였고 양쪽 게이트 보드의 $R_{ON} = 0.5\Omega$, $R_{OFF} = 3.6\Omega$ 의 같은 저항값을 선정해 On/Off 특성을 일치시켰다. Half-bridge 타입 Infineon 社의 FF1800R23IE7, IGBT 모듈을 선정했으며 정격 V_{CE} 는 2300V이며 정격 I_{CE} 는 1200A이다. 위에서 표기한 IGBT 모듈의 파라미터는 Table 1에 표기하였다.

2. 통합형 광 게이트 보드 제작

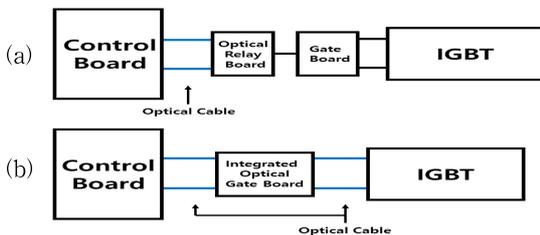


그림 1 (a) 기존 게이트 보드, (b) 개선 게이트 보드
Fig. 1 (a) existing gate board, (b) improved gate board

표 1 IGBT Module 파라미터
Table 1 IGBT Module Parameter

Category	Value	Condition
V_{CE}	2300V	$V_{CE} = 0V, T_{VI} = 25^{\circ}C$
I_{CE}	1200A	$T_{VI, max} = 150^{\circ}C, V_{CE} = 0V$
$V_{GE(TH)}$	5.8V	$I_C = 49.5 mA, V_{CE} = V_{GE}, T_{VI} = 25^{\circ}C$
V_{GES}	$\pm 20V$	$T_{VI} = 25^{\circ}C$
T_r	72ns	$I_C = 1800A, R_{ON} = 0.1\Omega,$
T_f	770ns	$R_{OFF} = 1.5\Omega, V_{CE} = 1200V, V_{GE} = \pm 15V, T_{VI} = 25^{\circ}C$

3. 실험 결과

3.1 PWM 응답 지연 비교 실험

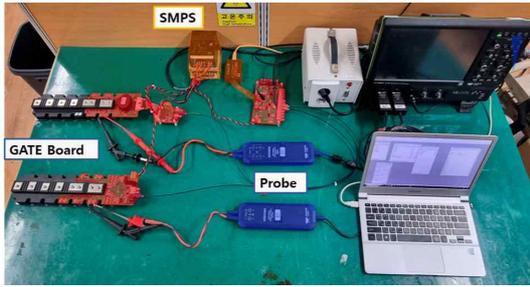


그림 3 응답 지연 비교 실험 환경
Fig. 3 Experimental setup for Response Delay Comparison

실험 환경은 그림 3 와 같고 응답 특성 비교를 위해 Duty 50%의 PWM 신호를 통합 광 게이트 보드와 기존 게이트 보드에 동일하게 인가해 비교를 진행하였다. 제어 보드와 게이트 드라이버 사이 신호를 비교해 통해 생기는 Delay 비교를 진행하였고 PWM 신호 Delay 변화를 비교하여 나타낸다.

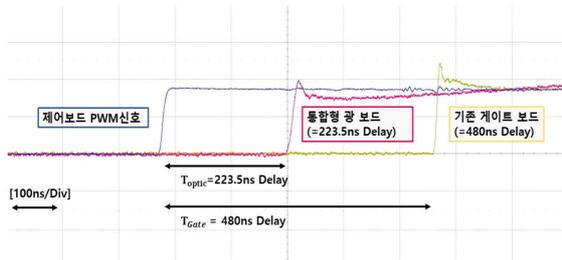


그림 4 PWM Delay 비교 파형
Fig. 4 PWM Delay Comparison Waveform

위 그림 4 와 같이 두 보드를 통한 응답 속도 지연 차이를 확인하였다. 기존 게이트 보드 적용 시 Delay($T_{Gate,Delay}$)=480ns로 측정되었으며, 수신신호가 40ns 범위로 흔들리는 문제를 관찰하였다. 개선된 보드를 적용할 경우 Delay($T_{Optic,Delay}$)=223.5ns로 감소했으며 응답지연을 줄이고 신호의 흔들림을 해결하였다.

3.2 DPT(Double pulse test) 실험

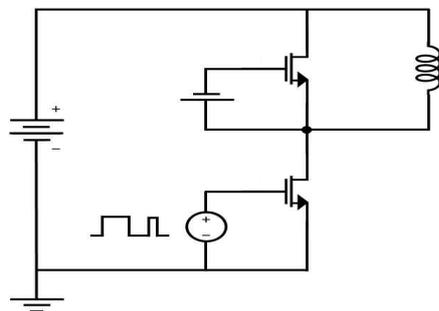
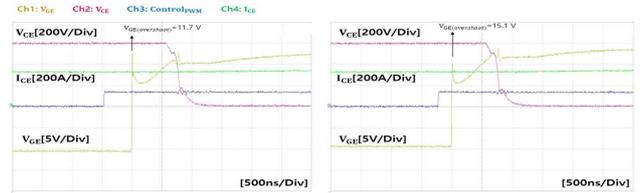
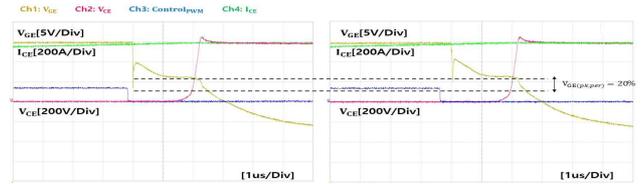


그림 5 그림 5 DPT 실험 회로 구성
Fig. 5 DPT Circuit Configuration



(a)



(b)

그림 6 IGBT DPT 펄스 파형, (a) Turn On 파형 (b) Turn Off 파형
Fig. 6 IGBT DPT Pulse Waveform, Turn On/Off Waveform (a),(b)

실험 구성은 그림 5와 같고 광 스위칭 소자의 실제 동작영역 성능 비교를 위한 DPT 실험을 수행한다. 첫 번째 펄스를 인덕터에 흘려 원하는 스위칭 전류대에 안착시키며 두 번째 펄스를 통해서 스위칭 특성을 분석한다. 안정적인 스위칭 동작 구간을 고려해 $V_{CE}=600V$, $I_{CE}=600A$ 영역에서 스위칭 특성 비교하며 인덕턴스 용량(L_A)=100uH, DC 커패시터 용량(C_{DC})=2000uF 에서 수행하였다. 게이트 전압(V_{GE})는 +15/-15V에서 구동했으며 실험 결과는 그림 6과 같이 나타난다. 그림 6은 두 번째 펄스에서의 IGBT의 Turn On/Off 동작 시, 게이트 전압(V_{GE}) 및 스위치 전압(V_{CE})/전류(I_{CE})를 나타낸다. 제작한 통합형 광 게이트 보드는 기존 게이트 보드에 비해 게이트 전압 노이즈 성분($V_{GE(overshoot)}$)이 20%가량 감소하는 것을 확인하였다.

5. 결 론

본 논문은 광 스위칭 소자 특성 확인 및 라인드라이버 소자 간 응답 지연 및 노이즈 확인과 개선을 위한 통합 보드를 제작하고 IGBT 전력반도체를 이용한 스위칭 파형을 비교 분석한다. 개선 보드를 통해 기존 게이트 보드 대비 256.5ns 더 빠른 응답 속도를 가지며 DPT 실험을 통해 $V_{GE(overshoot)}$ 가 감소하는 것을 확인하였다. 추후 광 스위칭 소자의 장점 활용을 극대화하기 위한 신호 보강 및 광 신호 전달 효율 개선 방안을 연구하고 진행한다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20212020800020)

참 고 문 헌

- [1] Dhama, R., Panahpour, A., Pihlava, T. et al. All-optical switching based on plasmon-induced Enhancement of Index of Refraction. Nat Commun 13, 3114 (2022).
- [2] H. Riazmontazer and S. K. Mazumder, "Optically Switched-Drive-Based Unified Independent dv/dt and di/dt Control for Turn-Off Transition of Power MOSFETs," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 4, pp. 2338-2349, April 2015.