

스위칭 잡음의 시간 특성 분석을 통한 주파수 특성 예측

Analysis of Switching Noise Time Characteristic and Estimation of Frequency Spectrum

최한울 · 유승렬* · 김은하* · 박동철 · 이재현

Han-Ol Choi · Seung-Real Ryu* · Eun-Ha Kim* · Dong-Chul Park · Jae-Hyun Lee

요 약

하이브리드 전기 차량 내에 존재하는 DC-DC 컨버터 또는 DC-AC 인버터에 의해 스위칭 잡음이 발생된다. 이 스위칭 잡음은 컨버터 또는 인버터의 스위칭 회로 내에 존재하는 전력 다이오드의 역 회복 동작에 의해 발생된다. 다이오드의 반전 시간과 역 회복 시간이 역 회복 구간의 모양을 결정한다. 본 논문은 스위칭 잡음의 주파수 스펙트럼을 다이오드 역 회복 구간의 모양을 통해 예측하고, 측정 결과와 비교하여 주요 주파수 구간이 다이오드의 반전 시간과 직접적인 연관이 있다는 것을 확인하였다.

Abstract

DC-DC converter and DC-AC inverter in a hybrid electric vehicle (HEV) generate the switching noise. It may be generated by the reverse recovery operation of the power diode in the switching circuit of the converter or the inverter. The shape of the reverse recovery region may be determined by both reverse time and recovery time in the diode. So, in this paper, the frequency spectrum of switching noise was estimated by the shape of the reverse recovery region and compared with the measured results. It shows that the meaningful region of the frequency spectrum is directly related with the reverse time.

Key words : HEV, DC-DC Converter, Switching Noise, Power Diode, Reverse Recovery Region

I. 서 론

최근 공기 오염과 연료 문제로 인해 하이브리드 전기 차량의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 하이브리드 전기 차량은 수 백 V의 고전압용 배터리를 사용한다. 이 고전압을 차량 전장부품에서 사용하는 전압 12 V로 강하시키기 위하여 DC-DC 컨버터를 사용한다. DC-DC 컨버터 내부에는 높은

스위칭 주파수를 가지는 스위칭 회로가 존재하며, 회로의 스위칭 동작에서 발생하는 잡음이 EMI(Electromagnetic Interference)의 가장 큰 원인이다.^[1] 이때 발생하는 스위칭 잡음에 의한 EMI가 주변 회로와 시스템 정상 동작의 저하를 일으킨다. 이러한 스위칭 회로에 의한 잡음을 발생시키는 가장 큰 원인은 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) 스위칭 회로이다. 스위칭 회로 내부에 존재하는 전력 다이오드

「본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No.2009T100200647).」

충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science & Engineering, Chungnam National University)

*자동차부품연구원(Korea Automotive Technology Institute)

· Manuscript received December 13, 2011 ; April 3, 2012 ; April 6, 2012. (ID No. 20111213-160)

· Corresponding Author : Jae-Hyun Lee (e-mail : jaehyun@cnu.ac.kr)

의 역 회복 동작이 스위칭 잡음의 주요 원인으로 전력 다이오드의 반전 시간과 회복 시간은 역 회복 구간의 모양을 결정하는 요인이다.^[2]

본 논문에서는 스위칭 회로 내부에 존재하는 다이오드에 의한 스위칭 잡음의 시간 특성을 통해 주파수 특성을 예측하는 방법을 제시하고, 측정 결과와 비교한다.

II. 스위칭 잡음 분석

그림 1은 DC-DC 컨버터에 사용되는 IGBT를 이용한 스위칭 회로이다.

IGBT 스위칭 회로는 그림 2와 같은 전류 파형을 발생시킨다. 전류 파형의 급격한 크기 변화(스위칭 잡음)는 스위칭 회로 내에 존재하는 다이오드의 역 회복 동작에 의해 발생된다.^[3]

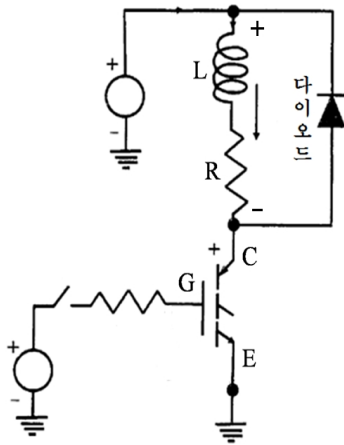


그림 1. IGBT를 이용한 스위칭 회로
Fig. 1. Switching circuit using IGBT.

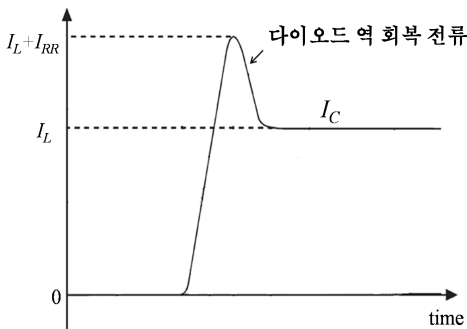


그림 2. IGBT 스위칭 회로 전류 파형
Fig. 2. Current waveform of IGBT switching circuit.

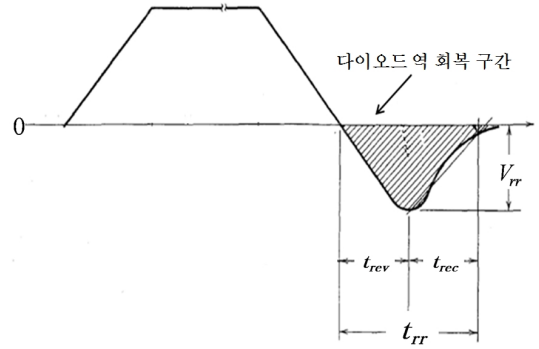


그림 3. 다이오드 역 회복 파형
Fig. 3. Diode reverse recovery waveform.

그림 3은 다이오드의 역 회복 파형이다. 다이오드의 역 회복 파형은 역 회복 시간 t_{rr} , 반전 시간 t_{rev} 와 회복 시간 t_{rec} , 역 회복 전압 V_{rr} 로 구성되어 있다. 반전 시간과 회복 시간은 다이오드의 역 회복 파형의 모양을 결정하는 요인이다. 반전 시간과 회복 시간은 동일 동작 조건의 다이오드일지라도 다이오드의 제조사 또는 모델에 따라 다른 값을 가진다. 반전 시간과 회복 시간을 통해 다이오드 역 회복 파형을 구성하고, 푸리에 변환하여 주파수 스펙트럼을 예측할 수 있다. 예측된 주파수 특성으로부터 사용하고자 하는 주파수 대역에서 EMI를 최소로 발생시키는 적절한 역 회복 파형을 가지는 다이오드를 선택할 수 있다.

III. 다이오드 역 회복

다이오드의 역 회복 특성의 파형 변화를 확인하

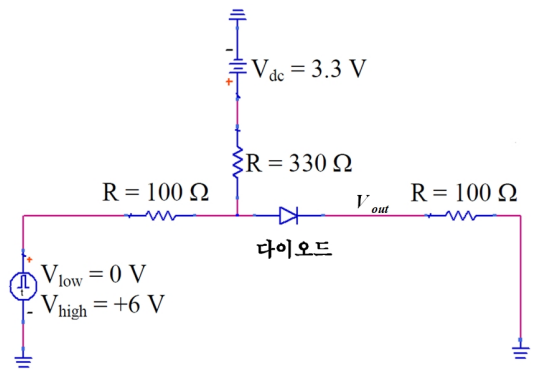


그림 4. 다이오드의 역 회복 특성 측정 회로
Fig. 4. Measurement circuit of reverse recovery time in diode.

기 위하여 그림 4와 같은 회로를 구성하여 실험을 진행하였다. 하이브리드 전기 차량에서 사용하는 고전압의 다이오드는 실험이 어려워 동작 전압 3.3 V를 가지는 1N4148과 1N5819 다이오드를 사용하여 역 회복 과정 변화에 의한 주파수 스펙트럼의 변화를 확인하였다.

3-1 측정 결과

그림 5와 표 1은 다이오드 1N4148의 출력 전압 측정 결과이다.

그림 6은 다이오드 1N4148의 주파수 스펙트럼이다. 주요 주파수 구간은 37 MHz 이하에 존재한다. 이 주파수는 반전 시간 30 ns로 계산한 33.3 MHz와 유사한 값이다. 주요 주파수 구간이란 주파수 스펙트럼이 잡음 레벨로 감소하기 전까지의 주파수 영역을 정의한 것이다.

그림 7과 표 2는 다이오드 1N5819의 출력 전압 측정 결과이다.

그림 8은 다이오드 1N5819의 주파수 스펙트럼이

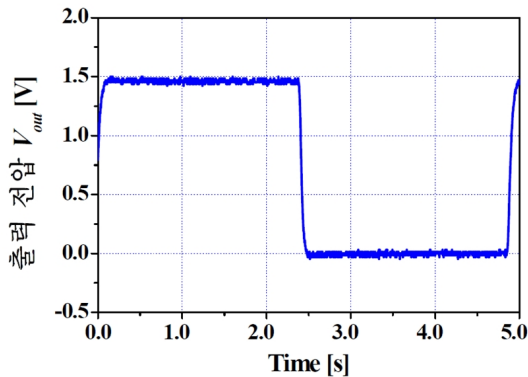


그림 5. 다이오드 1N4148을 사용한 스위칭 회로의 V_{out}
Fig. 5. V_{out} of switching circuit using diode 1N4148.

표 1. 다이오드 1N4148의 역 회복 전압 측정 결과
Table 1. Measurement result of reverse recovery time in diode 1N4148.

변수	특성
t_{rr}	222 ns
t_{rev}	30 ns
t_{rec}	192 ns
V_{rr}	-49.88 mV

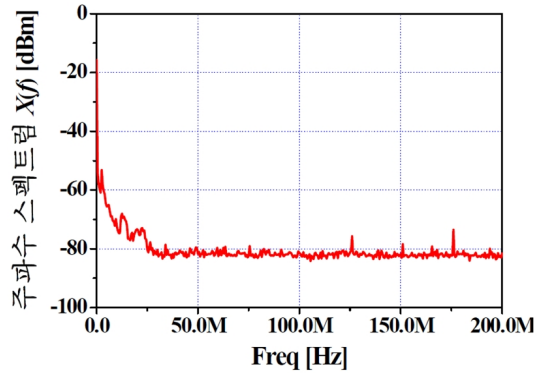


그림 6. 다이오드 1N4148을 사용한 스위칭 회로의 주파수 스펙트럼

Fig. 6. Frequency spectrum of switching circuit using diode 1N4148.

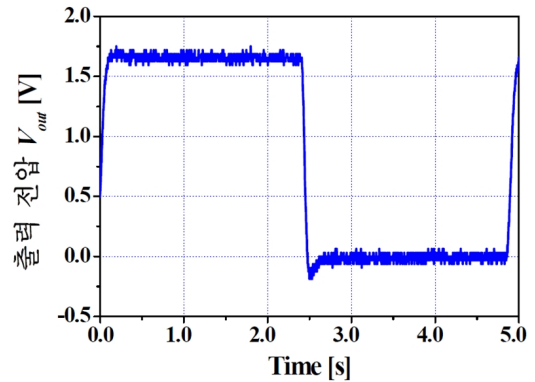


그림 7. 다이오드 1N5819을 사용한 스위칭 회로의 V_{out}
Fig. 7. V_{out} of switching circuit using diode 1N5819.

표 2. 다이오드 1N5819의 역 회복 전압 측정 결과
Table 2. Measurement result of reverse recovery time in diode 1N5819.

변수	특성
t_{rr}	195 ns
t_{rev}	22 ns
t_{rec}	173 ns
V_{rr}	-0.19 V

다. 주요 주파수 구간은 48 MHz 이하에 존재한다. 이 주파수는 반전 시간 22 ns로 계산한 45 MHz와 유사한 값이다.

그림 9와 표 3에서 다이오드 1N4148과 1N5819의 주파수 스펙트럼을 비교하였다. 주요 주파수 구간

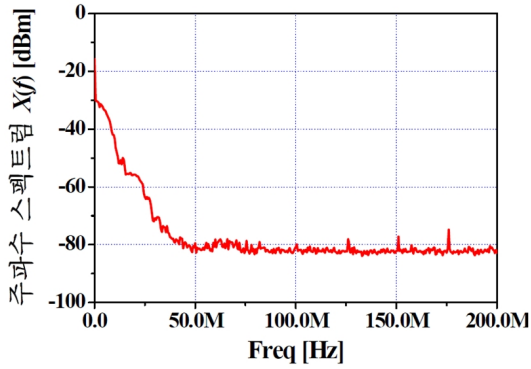


그림 8. 다이오드 1N5819을 사용한 스위칭 회로의 주파수 스펙트럼

Fig. 8. Frequency spectrum of switching circuit using diode 1N5819.

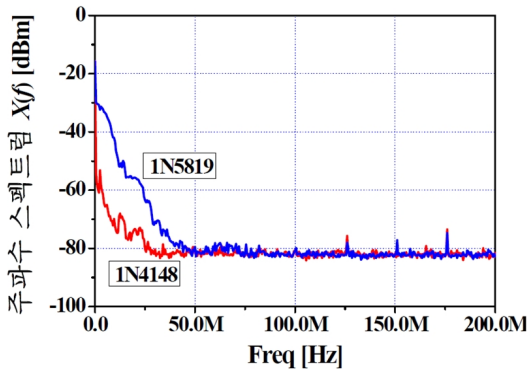


그림 9. 다이오드 1N4148과 1N5819의 주파수 스펙트럼 비교

Fig. 9. Comparison of frequency spectrums of diodes 1N4148 and 1N5819.

표 3. 다이오드 1N4148과 1N5819의 주파수 영역과 시간 영역 특성의 비교

Table 3. Comparison of frequency domain characteristic and time domain characteristic of diodes 1N4148 and 1N5819.

주요 주파수 구간	다이오드 모델	
	1N4148	1N5819
측정	37 MHz	48 MHz
계산 (반전 시간)	33.3 MHz (30 ns)	45 MHz (22 ns)

에서 주파수 스펙트럼의 크기는 다이오드 1N4148보다 1N5819가 더 크다. 그리고 주요 구간은 1N4148보다 1N5819가 더 넓다. 이러한 차이는 다이오드의 반

전 시간의 차이에 의한 것이다. 더 큰 반전 시간을 가지면 더 좁은 주요 주파수 구간을 가진다. 즉, 다이오드 선택 시 적절한 반전 시간을 갖는 다이오드를 선택하면 EMI에 유리한 스위칭 회로의 설계가 가능하다는 것을 알 수 있다.

3-2 반전 시간 t_{rev} 예측

실험을 통해 얻은 반전 시간을 이용해 주요 주파수 구간을 결정할 수 있었다. 그러나 실험을 통한 반전 시간의 예측 대신 다이오드의 데이터 시트와 간단한 수식을 이용하여 반전 시간을 계산할 수 있다. 반전 시간을 구하는 수식을 아래 식 (1)로 표현하였다^[4].

$$t_{rev} = \frac{t_{rr}(V_{rr}/50)^2}{2Q_{rr}(di/dt)} = \frac{t_{rr}(I_{rr})^2}{2Q_{rr}(di/dt)} \quad (1)$$

역 회복 시간 t_{rr} , 역 회복 전압 V_{rr} , 역 회복 전류 I_{rr} , 역 회복 전하 Q_{rr} 그리고 역 회복 전압의 기울기 di/dt 는 다이오드의 데이터 시트에서 제공되는 변수이다.

3-3 IGBT의 주요 주파수 구간

실제 DC-DC 컨버터에는 고전압용 다이오드를 포함하는 IGBT 모듈을 사용한다. IGBT의 데이터 시트에서 제공하는 변수와 식 (1)을 이용하여 반전 시간을 계산할 수 있다. 본 논문 결과의 타당성을 입증하기 위하여 참고문헌 [4]에서 사용된 IGBT(IRF사의 IGBT 모듈 GA100LS60U)의 주요 파라미터들로부터 계산된 반전 시간과 측정된 반전 시간, 그리고 계산된 주요 주파수 구간과 측정된 주요 주파수 구간 결과를 비교하였다.

참고문헌 [4]에서 측정된 반전 시간은 약 80 ns, 측정된 주요 주파수 구간은 약 12 MHz이다. 측정된 반전 시간으로부터 주요 주파수 구간을 계산하면 약 12.5 MHz이다. 이는 측정된 주요 주파수 구간인 12 MHz와 유사하다. 또한, GA100LS60U의 데이터 시트에서 제공하는 변수($t_{rr}=143$ ns, $I_{rr}=95$ A, $Q_{rr}=6813$ nC, $di/dt=1300$ A/ μ s)와 식 (1)을 이용하여 반전 시간을 계산하면 약 73 ns이며, 이를 이용하여 주요 주파수 구간을 계산하면 약 13 MHz으로 참고문헌 [4]에서 측정된 주요 주파수 구간인 12 MHz와 유사하다.

표 4. GA100LS60U의 반전 시간 및 주요 주파수 구간

Table 4. Reverse time and meaningful frequency region of GA100LS60U.

	참고문헌 [4]	주파수 구간 계산값	식 (1)을 이용한 계산값
반전 시간 (ns)	80	80	73
주요 주파수 구간(MHz)	12	12.5	13

이 결과를 표 4에 나타내었다.

IGBT 모듈의 데이터 시트에서 제공하는 변수를 이용하여 식 (1)로부터 반전 시간을 계산할 수 있으며, 이를 이용하여 주요 주파수 구간의 예측이 가능하다는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문은 주요 주파수 구간이 스위칭 회로 내에 존재하는 다이오드 역 회복 구간의 반전 시간에 직접적인 영향을 받는다는 것을 확인하였다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 반전 시간이 클수록, 주요 주파수 구간이 좁아진다는 것을 알 수 있었다. 그리고, 이 반전 시간을 측정하는 물론 데이터 시트를 이용하

여 구할 수 있음을 보였다. 전자파 간섭을 피하고자 하는 주파수 영역이 있을 때 반전 시간을 고려하여 스위칭 다이오드를 선택하면 전자파 간섭을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

[1] A. T. Bryant, L. Lu, E. Snati, J. L. Hudgins, and P. R. Palmer, "Modeling of IGBT resistive and inductive turn-on behavior", *IEEE Tran. Ind. Appl.*, pp. 904-914, vol. 44, no. 3, 2008.

[2] M. U. Robbins, *Power Electronics*, John Wiley & Sons, Inc., 2003.

[3] Y. H. Lee, A. Nasiri, "Analysis and modeling of conductive EMI noise of power electronics converters in electric and hybrid electric vehicles", *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2008. APEC 2008. Twenty-Third Annual IEEE*, pp. 1952-1957, Feb. 2008.

[4] J. Meng, W. Ma, Q. Pan, L. Zhang, and Z. Zhao, "Multiple slope switching waveform approximation to improve conducted EMI spectral analysis of power converters", *EMC IEEE Tran.*, pp. 742-751, vol. 48, no. 4, 2006.

최 한 울



2010년 2월: 충남대학교 전자전파 정보통신전공 (공학사)
 2010년 3월~현재: 충남대학교 전파공학과 석사과정
 [주 관심분야] PCB EMC, Automotive EMC

유 승 렬



1986년 2월: 충북대학교 물리공학과 (이학사)
 2008년 2월: 충남대학교 전파공학 전공 (공학석사)
 1986년 2월~1995년 2월: 국방과학연구소 EMI/EMC Lab. 연구원
 1995년 3월~현재: 자동차부품연구원 기업지원신뢰성본부 전자기파환경연구센터 센터장
 1997년 2월~현재: CISPR D 자동차 분과, ISO TC22 WG3 전문위원
 [주 관심분야] 조고주파 회로 설계, EMI/EMC

김 은 하



1993년 2월: 서울과학기술대학교 전자공학과 (공학사)
 2004년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
 2008년 8월: 충남대학교 전자공학과 박사과정 수료
 1990년 2월~1993년 2월: 국립공업

기술원 연구원
 1993년 3월~1996년 2월: (주)마마 연구원
 1996년 3월~현재: 자동차부품연구원 기업지원신뢰성본부 전자기파환경연구센터 팀장
 1997년 2월~현재: CISPR D 자동차 분과, ISO TC22 WG3 전문위원
 [주 관심분야] 조고주파 회로 설계, EMI/EMC

이 재 현



1978년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학사)
 1985년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자과 (공학석사)
 1993년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자과 (공학박사)
 1991년 2월~2001년 2월: 한국전자

통신연구원 책임연구원
 2001년 2월~현재: 충남대학교 전파공학과 교수
 [주 관심분야] EMI/EMC, Microwave Signal Processing Components, Satellite Microwave Components

박 동 철



1974년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1976년 2월: 한국과학기술원 전기 전자공학과 (공학석사)
 1984년 12월: Univ. of California, Santa Barbara (공학박사)
 1977년~1978년: Ruhr University, Bo-

chum, Germany 방문교수
 1994년~1998년: IEEE MTT Korea Chapter Chairman
 1998년~2001년: IEEE EMC Korea Chapter Chairman
 2000년~2001년: 한국전자파학회 회장
 2005년~2007년: 대덕 Wireless 포럼 회장
 1976년~현재: 충남대학교 전파공학과 교수
 [주 관심분야] Microwave and Millimeterwave Passive Components, Antennas, EMI/EMC