

# 단상 계통 연계형 풀브릿지 인버터의 스위칭 손실 모의 및 분석

손명수<sup>1</sup>, 임현지<sup>1</sup>, 조영훈<sup>†</sup>

## Simulation and Analysis of Losses of Switching Device for Single Grid-connected Full Bridge Inverter

Myeongsu Son<sup>1</sup>, Hyun-Ji Lim<sup>1</sup>, and Younghoon Cho<sup>†</sup>

### Abstract

This paper analyzes the losses of the switching device for a full bridge inverter connected to the grid. As the development of power conversion system, losses are dominant factors in judging the efficiency of a system. The losses of a switching device can be divided into switching loss and conduction loss, both of which can be estimated by analyzing periodic switching waveform. The switching loss is generated when the switch is turned on and off, while the conduction loss is generated when the switch is turned on. The estimated losses of the MOSFET switch are compared with the simulation results.

**Key words:** Grid connected inverter, Switching loss, Full bridge inverter

### 1. 서 론

태양광뿐만 아니라 원자력 에너지를 대체할 각종 신 재생 에너지들의 활용이 적극적으로 연구되는 가운데, 계통 연계를 위한 필수적인 전력 변환 장치는 인버터이다. 계통 연계형 인버터에 관한 안정성과 효율을 위하여 많은 제어 방법들이 연구되어 왔으며, 그러한 제어 시스템의 기반이 되는 인버터 자체의 효율 개선을 위하여 많은 반도체 소자들 또한 연구 되었다<sup>[1]-[5]</sup>.

전력 변환 시스템에 있어서 전력 손실을 감소하는 것은 효율 증대를 위한 중요한 요소이며, 전력 변환 시스템인 인버터 또한 모터 구동에 대한 효율 증대를 위해서는 인버터 자체의 효율도 개선될 필요가 있다.

전력 시스템의 전력 손실에는 전도 손실과 스위칭 손실이 고려되어야 한다. 전력 손실에 있어서 스위칭 손실은 필연적으로 발생하며, 효율을 고찰하기 위해서는 스위칭 소자의 손실을 고려하는 것이 필요하다. 스위칭 손실은 인버터에 사용되는 스위칭 소자에 따라 큰 차이가 다. 도통 손실이 낮은 Insulated gate bipolar transistor

(IGBT)를 이용하는 것이 스위칭 손실을 줄이기에 적합하나, Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET)보다 낮은 스위칭 속도로 인해 높은 스위칭 속도를 요구하는 시스템에서 사용하기엔 부적합하다. IGBT는 구조에 의하여 정상상태 턴 오프 동작에서 바이폴라 동작을 갖게 된다. 이러한 동작 특성에 의하여 턴 오프 시, 테일 전류가 남아 MOSFET 보다 느린 특성을 갖게 되기 때문에 높은 스위칭을 요구하는 시스템에서는 MOSFET을 사용하는 것이 더 적합하다<sup>[6][7]</sup>. 이와 같은 이유로, 본 논문에서는 계통 연계형 인버터 소자로 MOSFET을 이용하였으며, 스위칭 손실 또한 MOSFET에 관하여 고찰하였다.

본 논문에서 DC전원을 단상 AC로 변환해 주기 위하여 단상 풀브릿지를 사용할 것이며, 출력전압의 기본파가 원하는 전압 파형이 되도록 Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) 스위칭 방식 인버터에 관하여 고찰하였다. 인버터를 스위칭하는 SPWM에 관한 손실은, 직류만을 흘리는 컨버터의 손실과는 달리, 정현파 전류가 지속적으로 흐르므로, 시간에 따라 변하는 손실을 고려하여 식을 전개하였다.

본 논문에서는 단상 풀브릿지 인버터의 스위칭 손실과 도통손실을 분석하기 위한 이론과 식을 전개하며, 식에 따른 계산 과정과 소자에 따른 손실 값을 PSIM Thermal Module을 사용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 계산된 손실 값과 시뮬레이션 손실 값을 비교하여 이론식과 시뮬레이션 결과가 일치함을 보였다.

Paper number: TKPE-2018-23-4-10

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

<sup>†</sup> Corresponding author: yhcho98@konkuk.ac.kr, Dept. of Electrical Eng., Konkuk University  
Tel: +82-2-450-4109 Fax: +82-2-447-9168

<sup>1</sup> Dept. of Electrical Eng., Konkuk University

Manuscript received Jan. 1, 2018; revised Feb. 15, 2018; accepted Feb. 28, 2018

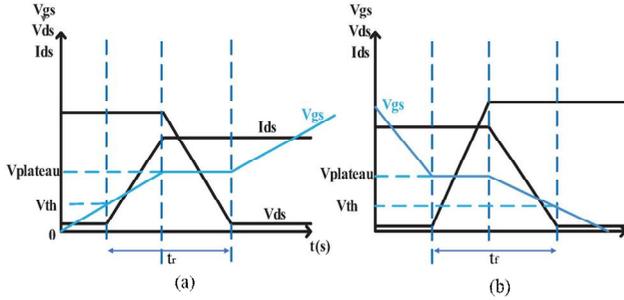


Fig. 1. (a) MOSFET turn-on transient.  
(b) MOSFET turn-off transient.

## 2. 단상 풀브릿지 인버터를 위한 전류 분석

MOSFET을 스위칭 하는 PWM 파형은 식 (1)에 의한 함수에 의해 달라지며, 이를 지령 값이라고 한다.

$$d(t) = \frac{1}{2} \left[ 1 + M \sin \left( \int_{-\infty}^t \omega dt \right) \right] \quad (1)$$

$$d(\theta) = \frac{1}{2} [1 + M \sin(\theta)]$$

이때 M은 변조지수(modulation index)이다. 또한 계통에 흐르고 있는 위상 전류와 지령 값을 다음과 식 (2)와 같은 방정식으로 정의한다<sup>[8]</sup>.

$$i_\phi = I_\phi \sin \theta \quad (2)$$

$$d_Q = \frac{1}{2} [1 + M \sin(\theta + \phi)]$$

이때  $\phi$ 는 위상 전류와 지령 값 사이의 위상차이다. 지령 값을 통해 스위치에 흐르는 전류에 대한 실효값은 식 (3)을 통해 구한다.

$$|I_Q|_s = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi i_\phi^2 d_Q d\theta}$$

$$= I_P \sqrt{\frac{1}{4\pi} \int_0^\pi \{\sin^2 \theta [1 + M \sin(\theta + \phi)]\}} \quad (3)$$

$$= I_P \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{M \cos \phi}{3\pi}}$$

이때  $I_P$ 는 위상 전류의 피크 값이다.

## 3. 단상 풀브릿지 인버터를 위한 스위칭 손실과 도통손실 분석

### 3.1 단상 풀브릿지 인버터 스위칭 손실 분석

MOSFET에서 발생하는 스위칭 손실은 스위치의 턴 온과 턴 오프의 과도상태에서 드레인-소스 전압( $V_{DS}$ )과 드레인 전류( $I_D$ )의 교차에 의해 발생된다.

이때, 스위칭 손실은 턴 온 구간에서 발생하는 손실( $P_{on}$ )과 턴 오프 구간에서 발생하는 손실( $P_{off}$ ) 두 가지로 나뉘는데, 파워 MOSFET의 턴 온·오프 구간에서의 전력 손실 식은 식 (4)와 식(5)이며,  $t_r$ 과  $t_f$ 는 각각 스위칭 소자의 상승시간과 하강시간이다<sup>[9]</sup>.

$$P_{on} = (V_{DS} \cdot I_D \cdot t_r / 2 + Q_{rr} V_{DS}) \cdot f_{sw} \quad (4)$$

$$P_{off} = (V_{DS} \cdot I_D \cdot t_f / 2) \cdot f_{sw} \quad (5)$$

이때  $I_D$ 는 드레인에 흐르는 전류로서, 듀티 값을 고려한 실효값이다.  $I_D$ 는 식 (3)에 의해 식 (6)과 같이 표현된다.

$$I_D = I_{peak} \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{M \cos \phi}{3\pi}} \quad (6)$$

따라서 스위칭 손실 식은 식 (7)과 같다.

$$P_{sw} = [V_{DS} \cdot I_D \cdot (t_f + t_r) / 2 + Q_{rr} \cdot V_{DS}] \cdot f_{sw} \quad (7)$$

### 3.2 단상 풀브릿지 인버터 전도 손실 분석

MOSFET의 도통 손실은 드레인-소스 저항( $R_{DS(on)}$ )과 드레인 전류( $i_D$ )을 이용한 MOSFET 근사를 통해서 계산할 수 있다. 이때 드레인-소스 전압은 식 (8)과 같다.

$$V_{DS}(t) = R_{DS(on)} \cdot i_D(t) \quad (8)$$

MOSFET의 순시 전력 도통 손실 값은 식 (9)로 표현된다<sup>[10]</sup>.

$$P_{FET,cond}(t) = V_{DS}(t) \cdot i_D(t) = R_{DS(on)} \cdot i_D^2(t) \quad (9)$$

위에서 얻은 순시 도통 전력 손실 값을 스위칭 주기에 대하여 적분하면 MOSFET 도통 손실의 평균값을 알 수 있다.

$$P_{FET,cond} = \frac{1}{T_{sw}} \int_0^{T_{sw}} (R_{DS(on)} \cdot i_D^2(t)) dt \quad (10)$$

$$= R_{DS(on)} \cdot I_D^2$$

### 3.3 단상 풀브릿지 인버터 스위치 손실 분석

본 논문에서의 MOSFET의 스위치 손실은 시물레이션을 기반으로 계산 및 해석하므로, 위에서 전개한 식에 들어갈 파라미터 또한 시물레이션에 들어갈 파라미터 값과 동일해야 한다. 표 1은 본 논문의 시물레이션 파라미터이다.

식 (7)과 (10)에 의하면 MOSFET의 전력 손실은 식 (11)로 정리된다.

TABLE I  
SIMULATION ELEMENT PARAMETER

$V_{DS}$	400 V	$R_{DS(on)}$	0.04 $\Omega$
$I_{peak}$	15.042 A	$Q_{rr}$	0.283 $\mu C$
$t_r$	52 ns	$t_f$	34 ns
$M$	1	$f_{sw}$	10 kHz, 20 kHz

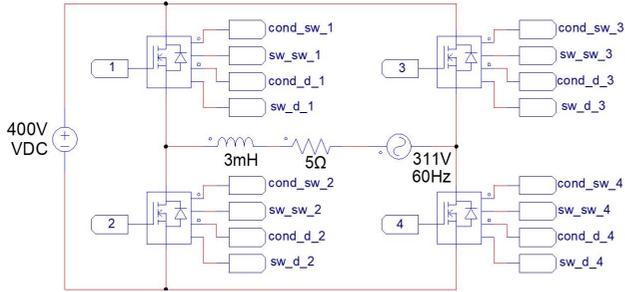


Fig. 2. Single phase full bridge inverter simulation circuit.

$$P_{loss} = [V_{DS} \cdot I_D \cdot (t_f + t_r) / 2 + Q_{rr} \cdot V_{DS}] \cdot f_{sw} + R_{DS(on)} \cdot I_D^2 \quad (11)$$

이때  $I_D$ 는  $M=1$ 이며,  $\phi=0$ 으로 가정하면 아래와 같이 식 (12)로 간략화 된다.

$$I_D = I_{peak} \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{M \cos \phi}{3\pi}} = I_{peak} \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{1}{3\pi}} \quad (12)$$

식 (12)를 이용하며  $I_D$ 를 계산하면 7.2135 A이며, 따라서 주파수가 10 kHz일 때, 식 (11)에 표 1에 있는 파라미터들을 대입하여 계산해보면, 4개의 스위치에서 발생하는 손실의 총 합( $P_{loss1,all}$ )은 17.87 W이다.

또한 주파수가 20 kHz 인 경우, 위 식에 대입하여 계산해 보았을 때, 손실( $P_{loss2,all}$ )은 27.37 W로 계산된다.

#### 4. 시뮬레이션

단상 풀브릿지 인버터의 손실에 대한 분석을 위해 사용한 프로그램은 PSIM Thermal analysis이다. Thermal Module Analysis를 통하여 온도에 따른 소자의 저항 등의 실제 소자의 특성을 반영하여 시뮬레이션을 진행하였다. PSIM 시뮬레이션을 통해 스위칭 소자의 손실, 스위치 도통 손실과 스위치 손실, 그리고 다이오드 스위치 손실과 도통 손실을 측정하였다.

손실 해석을 위한 반도체 소자는 제조사의 데이터시트로부터 입력할 수 있으며 이를 데이터베이스화 하여 손실 해석 분석을 할 수 있다. 시뮬레이션의 경우 그림 2와 같으며, 데이터베이스에 관한 설정 또한 그림 3을 통해 확인할 수 있다.

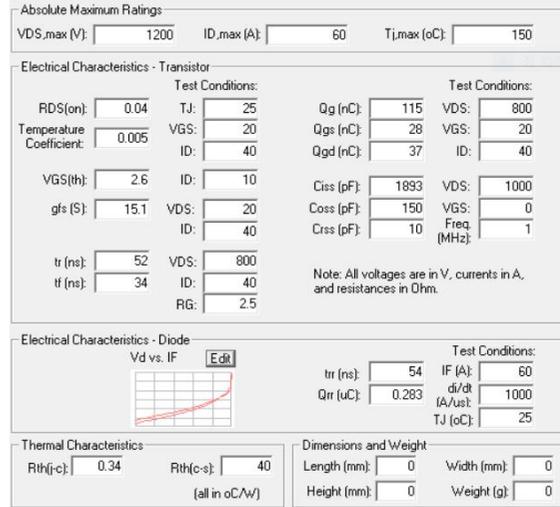


Fig. 3. Device database editor.

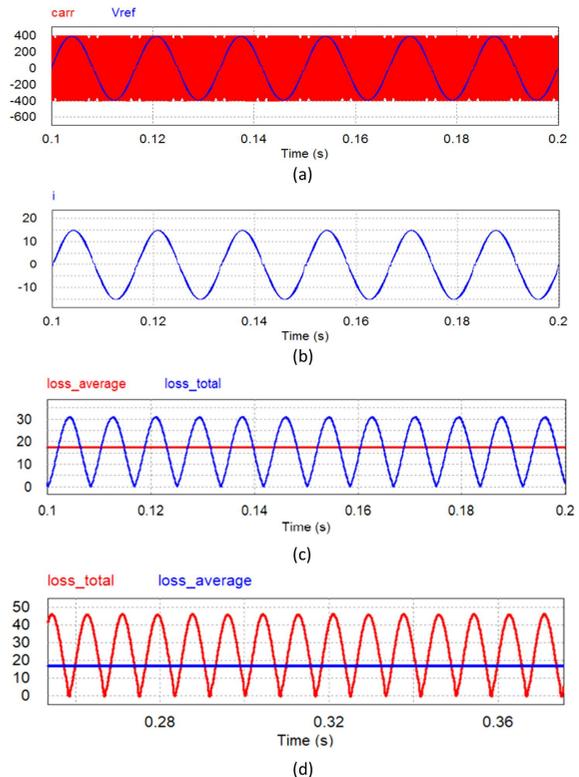


Fig. 4. (a) Voltage Reference and Carrier Voltage. (b) Output Current Waveform. (c) Sum of switch loss and average value when frequency is 10kHz. (d) Sum of switch loss and average value when frequency is 20kHz.

그림 2를 통해 MOSFET 인버터 시뮬레이션 회로는 4개의 MOSFET 소자, 인덕턴스, 저항 그리고 계통인 311V 60 Hz를 갖는 교류 전원으로 구성되어 있음을 알 수 있다. MOSFET 소자에 연결된 태그들을 통해 각 소자들에서 발생하는 스위칭의 전도손실과 스위칭손실 그

리고 다이오드의 전도손실과 스위칭 손실을 측정 및 분석하였다.

시뮬레이션의 파라미터는 표 1에 기술되어 있으며, 그 외 계통과의 전류 위상을 맞춰주기 위한 전류 제어기 또한 본 시뮬레이션에서 동작하고 있다. 즉 전류 지령 값과 계통 전류간의 위상차는 0이며, 3.3에서  $\phi=0$ 으로 가정하고 풀이한 계산 과정이 올바름을 알 수 있다.

그림 2의 시뮬레이션을 통하여 전류와 전압 파형은 도시하면 그림 4와 같다.

그림 4(a)에 보이는 전압지령의 피크 값과 캐리어의 피크 값이 거의 동일하므로 캐리어와 지령 피크 값의 비인,  $M$ 은 1임을 알 수 있다. 또한 스위치 소자의 전체 손실 전력을 구하면 그림 5(c)에서 보이는 것처럼, 스위칭 주파수가 10 kHz일 때와 20 kHz일 때 각각의 스위치 손실의 평균값이 17.35 W와 26.94 W임을 확인할 수 있다. 위 식에서 보이는 이론값 17.87 W와 27.37 W를 기준으로 시뮬레이션 스위치 손실의 평균값인 17.35 W와 26.94 W의 오차는 약 2.93 %와 1.596 %로, 이론과 유사함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 MOSFET으로 구성된 인버터의 스위치 손실을 구하기 위하여 SPWM에 의한 스위치 전류의 실효값과 스위칭 손실과 도통 손실에 관한 식을 정리 및 계산하였다. 이를 시뮬레이션 값과 비교하여 유도한 식들이 실제 시뮬레이션과 일치하는지 확인하였다.

각 스위치에 흐르는 전류를 통해 도통손실과 스위칭 손실을 계산하였고, 이를 통해 풀브릿지 인버터에서 발생하는 전체 손실을 계산하였다.

시뮬레이션은 계통에 연결되는 인버터 회로를 PSIM으로 구성하였으며, Thermal Module을 사용하여 시뮬레이션을 진행하였다.

이론식을 통하여 계산한 값을 시뮬레이션을 통해 측정된 값과 비교해 보았을 때 실제로 일치함을 알 수 있었으며, 이를 통하여 본 논문에서 정리한 식을 통하여 계통 연계형 단상 풀브릿지 인버터에 관한 손실을 구할 수 있음을 확인 및 검증하였다.

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 산업연계 교육활성화 선도대학(PRIME) 사업에서 지원을 받아 수행된 연구임.

## References

- [1] S. Wall, X. C. Hong, L. Sha, and J. R. Xie, "High-efficiency PV inverter with SiC technology," in *IET Renewable Power Generation*, Vol. 12, No. 2, pp. 149-156, 2018.
- [2] M. Rajeev and V. Agarwal, "Single phase current source inverter with multiloop control for transformerless grid - PV interface," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 54, No. 3, pp. 2416-2424, May/Jun. 2018.
- [3] S. K. Kim, H. S. Han, Y. J. Woo, and G. H. Cho, "A low-cost high-efficiency CCFL inverter with new capacitive sensing and control," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 21, No. 5, pp. 1444-1451, Sep. 2006.
- [4] H. I. Eini, S. Bacha, and D. Frey, "Improved control algorithm for grid-connected cascaded H-bridge photovoltaic inverters under asymmetric operating conditions," *IET Power Electronics*, Vol. 11, No. 3, pp. 407-415, 2018.
- [5] O. A. Rahim, H. Funato, and J. Haruna, "Grid-connected boost inverter for low-power PV applications with model predictive control," *The Journal of Engineering*, Vol. 2017, No. 7, pp. 318-326, Jul. 2017.
- [6] S. Eio and N. Y. A. Shammass, "IGBT tail current reduction by current injection technique," in *43rd International Universities Power Engineering Conference*, Padova, 2008, pp. 1-4, 2008.
- [7] F. Zhang, et al., "Adjustable high-speed insulated gate bipolar transistor," *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 34, No. 3, pp. 1021-1025, Jun. 2006.
- [8] K. Berringer, J. Marvin, and P. Perruchoud, "Semiconductor power losses in AC inverters," *Industry Applications Conference, 1995. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95., Conference Record of the 1995 IEEE*, Orlando, FL, 1995, Vol. 1, pp. 882-888, 1995.
- [9] Z. J. Shen, Y. Xiong, X. Cheng, Y. Fu, and P. Kumar, "Power MOSFET switching loss analysis: A new insight," *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*, Tampa, FL, 2006, pp. 1438-1442, 2006.
- [10] J. Guo, H. Ge, J. Ye, and A. Emadi, "Improved method for MOSFET voltage rise-time and fall-time estimation in inverter switching loss calculation," *2015 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Dearborn, MI, 2015, pp. 1-6, 2015.