

단상 계통 연계형 풀브릿지 인버터의 스위칭 손실 모의 및 분석

손명수, 임현지, 조영훈
건국대학교 전력전자연구소

Simulation and Analysis of Losses of Switching Device for Single Grid-connected Full bridge inverter

Myeong-su Son, Hyun Ji Lim, Younghoon Cho
Konkuk Univ. KOPEL

ABSTRACT

This paper presents analysis of losses of switching device for full bridge inverter connected to grid. The losses are a dominant factor that judges efficiency of the system. The losses of switching device are divided to switching loss and conduction loss. They are can be estimated by analyzing periodic switching waveforms. The switching loss is generated at the point that turn on and off. And the conduction loss is generated while the switch is on condition. The estimated losses of switch are compared to simulation result in this paper.

1. 서론

전력손실은 전력 변환 시스템의 효율 향상에 있어서 중요한 역할을 하고 있다. 전력 손실에는 전도 손실과 스위칭 손실이 고려되어야 한다. 전력 손실에 있어서 스위칭 손실이 지배적이기 때문에 스위칭 소자의 손실을 고려하는 것이 중요하다.

교류전원의 출력을 공급하기 위해서는 고효율의 인버터 회로가 필요하다. 단상인버터는 풀브릿지 회로를 이용하여 교류전원을 생성하며 출력전압의 기본파 전압이 원하는 전압이 되도록 펄스 폭 변조(Pulse Width Modulation)을 실시한다.

본 논문에서는 단상 풀브릿지 인버터의 스위칭 손실과 도통 손실을 분석하기 위한 이론과 계산과정을 서술하며, 실제 사용된 소자의 손실을 계산한다. 계산된 손실 값과 PSIM을 이용한 시뮬레이션 손실 값을 비교한다.

2. 단상 풀브릿지 인버터를 위한 스위칭 손실과 도통손실 분석

2.1 단상 풀브릿지 인버터 스위칭 손실 분석

MOSFET에서 발생하는 스위칭 손실은 스위치의 턴온과 턴오프 과도상태에서의 드레인 소스 전압(V_{DS})과 드레인 전류(I_{DS})의 교차에 의한 성분에 의해 발생한다. 이때, 턴온 구간에서 발생하는 손실(P_{on})과 턴오프 구간에서 발생하는 손실(P_{off}) 두 가지로 나뉘는데, 파워 MOSFET의 턴오프 구간에서의 전력손실 식은 아래와 같다.

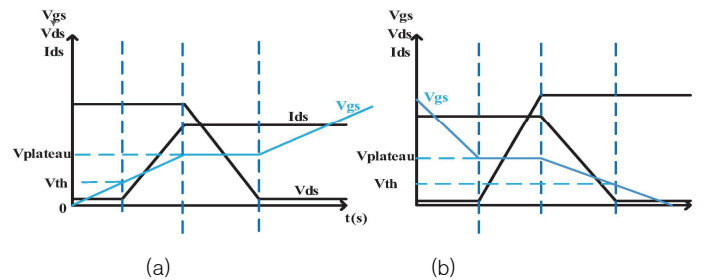


그림 1 (a) MOSFET 턴 온 상태 (b) MOSFET 턴 오프 상태
Fig. 1 (a) MOSFET turn-on transient (b) MOSFET turn-off transient.

$$P_{on} = V_{DS} \cdot I_D \cdot t_r / 2 + Q_{rr} V_{DS} \quad (1)$$

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

이때 I_D 는 드레인에 흐르는 전류로서, 듀티 값을 고려한 실효율이다. I_D 는 아래와 같이 표현되며, ϕ 는 부하의 전압과 전류의 위상차, 그리고 M 은 캐리어와 지령 피크값의 비이다.

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

따라서 스위칭 손실 식은 아래와 같다.

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

2.2 단상 풀브릿지 인버터 전도 손실 분석

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

$$V_{DS}(i_D) = R_{DS(on)}(i_D) \cdot i_D \quad (5)$$

MOSFET의 순시 전력 도통 손실 값은 아래의 식과 같다.

$$P_{FET,cond}(t) = V_{DS}(t) \cdot i_D(t) = R_{DS(on)} \cdot i_D^2(t) \quad (6)$$

위에서 얻은 순시 도통 전력 손실 값을 스위칭 주기에

대하여 적분하면 MOSFET 도통 손실의 평균값을 알 수 있다.

$$P_{FET,cond} = \frac{1}{T_{sw}} \int_0^{T_{sw}} (R_{DS(on)} \cdot i_D^2(t)) dt = R_{DS(on)} \cdot I_D^2 \quad (7)$$

2.3 단상 풀브릿지 인버터 스위치 손실 시뮬레이션

시뮬레이션의 경우 아래 그림2와 같이 PSIM Thermal Module을 이용하여 손실 값을 비교한다.

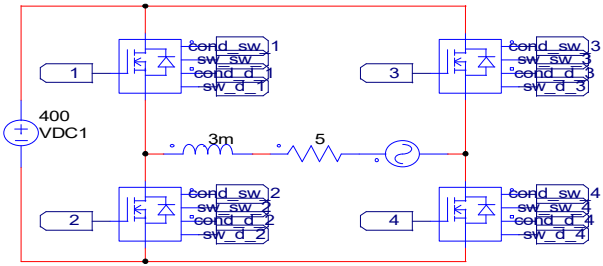


그림 2 단상 풀브릿지 MOSFET 인버터 시뮬레이션 회로
Fig. 2 Single phase full bridge inverter simulation circuit

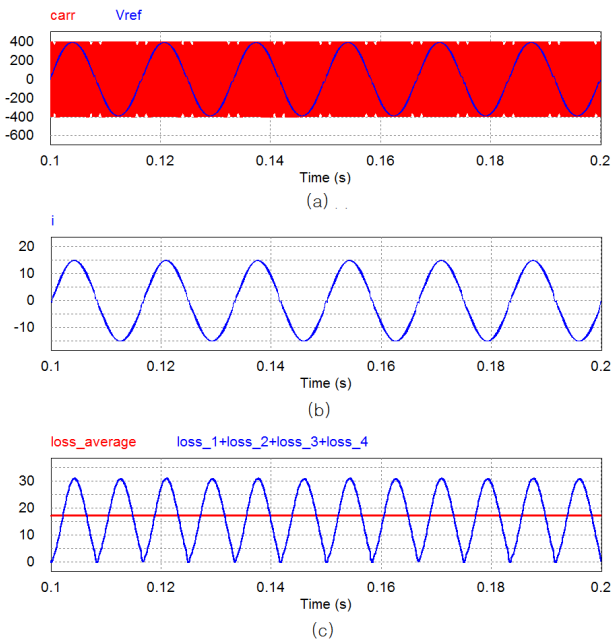


그림 3 (a)전압 지령과 캐리어 (b)출력 전류의 파형 (c)스위치 손실의 합과 평균값
Fig 3. (a)Voltage Reference and Carrier Voltage (b)Output Current Waveform (c)Sum of switch loss and average value

그림 3(a)에 보이는 전압지령의 피크값과 캐리어의 피크값이 거의 동일하므로 캐리어와 지령 피크값의 비인, M 은 1이다. 또한 그림 3(b)에 보이는 출력 전류 파형의 피크 값이 15A 이므로 ,아래 시뮬레이션에 사용된 소자의 파라미터를 아래 표와 같이 작성할 수 있다.

표 1 시뮬레이션 소자의 파라미터
Table.1 Simulation element parameter

V_{DS}	400 V	$R_{DS(on)}$	0.04 Ω
I_{peak}	15 A	Q_{rr}	0.283 μC
t_r	52 ns	t_f	34 ns
M	1	f_{sw}	10k Hz

위와 같이 회로를 구성하여 스위치 소자의 손실 전력을 구하면 그림 3(c)에서 보는 것처럼, 스위치 손실의 평균값이 17.3W 임을 확인할 수 있다.

2.4 단상 풀브릿지 인버터 스위치 손실 계산

식 (4)와 (7)에 의하면 스위치의 전력 손실은 아래와 같다.

$$P_{loss} = V_{DS} \cdot I_D \cdot (t_f + t_r)/2 + Q_{rr} \cdot V_{DS} + R_{DS(on)} \cdot I_D^2 \quad (10)$$

표3에 있는 파라미터들을 대입하여 계산해보면, 4개의 스위치에서 발생하는 손실은 아래와 같다.

$$P_{loss,all} = 4P_{loss} = 17.9083 W \quad (11)$$

위 식에서 보이는 이론값 17.9 W을 기준으로 시뮬레이션 스위치 손실의 평균값인 17.3 W와의 오차는 약 3.4 %로, 이론과 큰 차이가 나지 않음을 알 수 있다.

3. 결론

이론을 통하여 계산한 스위치 손실과 시뮬레이션에서 보이는 스위치 손실 전력의 평균값이 매우 유사함을 알 수 있으며, 위와 같은 식을 통하여 스위치 손실을 구할 수 있음을 확인할 수 있다.

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 산업연계 교육활성화 선도대학(PRIME) 사업에서 지원을 받아 수행된 연구임

이 논문은 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 공학 교육혁신지원사업 『공학교육혁신센터』 사업으로 수행된 연구임

참고 문헌

- [1] Ken Berringer, Semiconductor Power Losses in AC Inverters, Conference Record of the 1995 IEEE, pp. 883 886.
- [2] Jing Guo, Improved Method for MOSFET Voltage Rise time and Fall time Estimation in Inverter Switching Loss Calculation, IEEE Electrical and Computer Engineering Department, McMaster, ON, 2015, pp. 2 4.
- [3] 김민국, 전력 변환 장치 효율 개선을 위한 손실 분석 연구, The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol.19, No. 1, pp. 83 84. 2014, February