

손성우*, 박기범*
한국과학기술원*

3Phase Inverter Loss Analysis Under Switch Failure and Grid Unbalance Conditions

Seong-Woo Son*, Ki-Bum Park*
KAIST*

Abstract - 본 논문에서는 계통 불평형 및 다양한 스위치 개방 고장 상황에서 계통 연계형 인버터 내부 전력 반도체 소자의 전력 손실을 비교 분석한다. 정상상태와 비교하여 각 상의 상단 스위치 개방 시 나머지 스위치들에 미치는 영향을 수식적으로 해석한다. 또한 계통 A상 전압 강하에 따른 계통 불평형이 스위치 손실에 미치는 영향을 인버터와 정류기 동작에서 각각 정량적으로 검증한다.

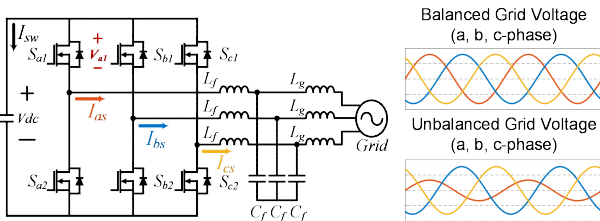
1. 서 론

최근 신재생 에너지 및 에너지 저장 장치(ESS)의 보급이 확대됨에 따라 계통 연계형 인버터의 신뢰성 및 수명 연장 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 인버터 시스템 내의 전력 반도체 스위치는 반복된 스위칭 동작과 높은 전류, 전압 스트레스로 인해 열적 소손에 가장 취약한 부품이다. 특히, 게이트 드라이버의 오작동이나 열화로 인한 스위치 개방 고장이 발생하면 특정 소자에 과도한 발열이 집중되어 2차적인 시스템 고장을 초래할 수 있다. 또한 계통에 연계된 시스템이 늘어남에 따라 계통 전압의 불평형 현상이 빈번하게 발생한다. 이는 시스템 전체적으로 왜곡을 유발해 스위치의 손실 특성을 더욱 악화시킨다. 따라서 본 논문은 계통 연계형 3상 인버터 시스템에서 스위치 개방 고장 및 계통 전압 불평형이 동시에 발생할 때, SiC-MOSFET 소자의 손실을 정량적으로 분석하고 PLECS 시뮬레이션을 통해 교차 검증한다.

2. 본 론

2.1 스위치 손실 및 계통 불평형

일반적인 계통 연계형 3상 인버터에서 스위칭 동작 중 내부적인 열적 한계 초과나 외부적인 DSP 제어 오류로 인해 특정 스위치에 게이팅 신호가 인가되지 않는 개방 고장이 발생할 수 있다. 이와 동시에 계통 전압에 역상분이 포함되는 불평형 상황이 겹치면, 인버터는 전류 지령을 추종하기 위해 비정상적인 전압 벡터를 인가하게 되어 손실 비대칭성이 극대화된다.

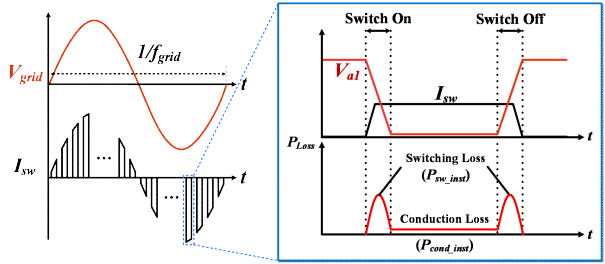


〈그림 1〉 3상 계통 연계형 인버터

2.1.1 스위치 손실의 종류와 계산

스위치 손실은 대부분 스위칭 소자에서 발생하며 전도 손실(Conduction Loss), 스위칭 손실(Switching Loss)로 나뉜다. 전도 손실은 소자의 도통 전압에 의해 발생하고, 스위칭 손실은 스위칭 동작 시 전압과 전류가 교차하는 구간에서 발생한다. 스

위치 손실의 평균은 스위치의 온-저항, 접합 온도, 출력 전류 등을 고려하여 계산할 수 있다[1].



〈그림 2〉 도통 손실과 스위칭 손실

〈표 1〉 시스템 파라미터

전체 전력	220 kW
DC-Link 전압	1500 V
정격 전류	185 Arms
계통 기본 주파수 f_{grid}	60 Hz

2.2 시뮬레이션 파형 및 손실 분석

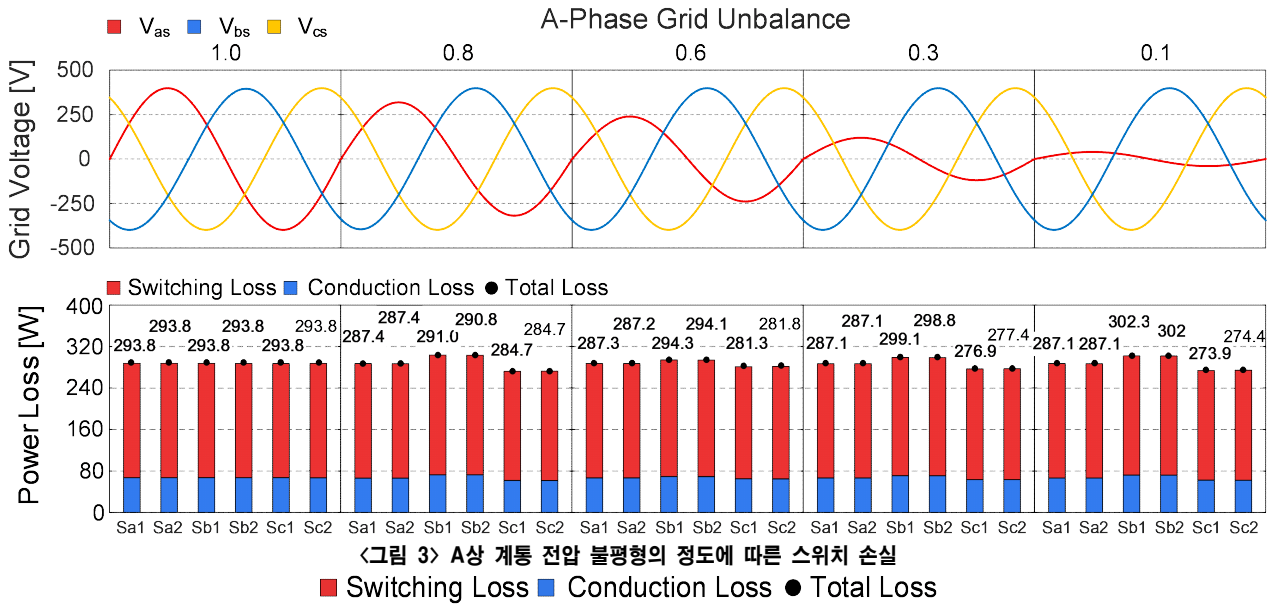
시뮬레이션 파라미터는 표1에 기재되어 있다. DC-link 전압은 1500 V, 정격 전류는 185 Arms이다. 계통 선간 전압은 690 Vrms, 계통 기본 주파수는 60 Hz, 스위칭 주파수는 12.5 kHz이다. 시뮬레이션 시나리오는 표2에 기재되어 있다. 인버터와 정류기 동작, S_{a1} 고장 (Case 1), S_{a1}, S_{b1} 고장 (Case 2), S_{a1}, S_{b1}, S_{c1} (Case 3) 고장 3가지, 계통 A상의 전압이 정상 대비 20% 작아진 경우로 선정하여 시뮬레이션을 진행하였다.

〈표 2〉 시뮬레이션 시나리오

시나리오	계통 평형	계통 불평형
인버터 동작	Case 1, 2, 3	Case 1, 2, 3
정류기 동작	Case 1, 2, 3	Case 1, 2, 3

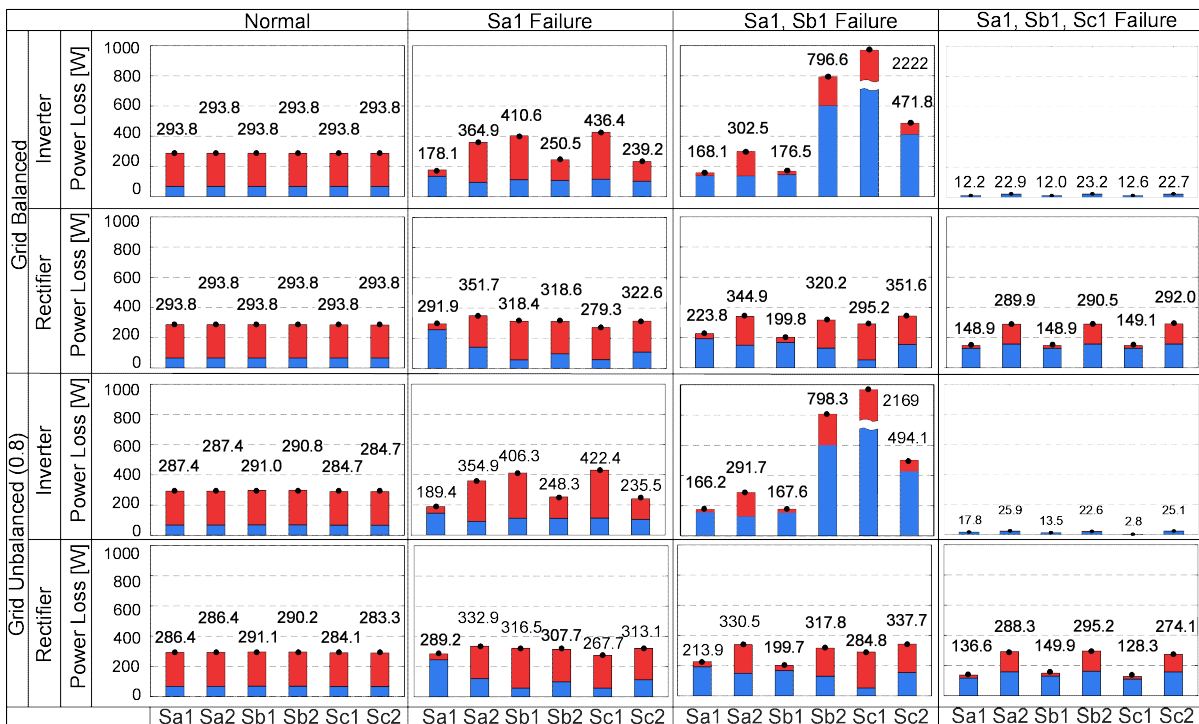
2.2.1 계통 불평형의 정도에 따른 스위치 손실

그림 3은 A상 계통 전압의 불평형을 변화에 따른 각 상황별 MOSFET 소자의 손실 분포를 보여준다. 시뮬레이션 결과에 따르면, 계통 전압의 불평형 정도가 심화되더라도 정상 동작 중인 소자들의 총손실은 가시적인 급증이나 뚜렷한 변화를 나타내지 않았다. 계통 전압의 크기가 강하하더라도, 인버터의 전류 제어기는 설정된 정격 지령 전류를 추종하기 위해 지속적으로 출력 전압 벡터를 보상하여 계통으로 주입되는 전류를 일정하게 유지한다. 소자의 손실은 전류의 요인에 지배적인 물리적 특성을 지니고 있기 때문에 전류의 크기가 크게 변하지 않아 손실의 급격한 변화가 관찰되지 않는다.



〈그림 3〉 A상 계통 전압 불평형의 정도에 따른 스위치 손실

Legend: Switching Loss (red), Conduction Loss (blue), Total Loss (black dot)



〈그림 4〉 시뮬레이션 시나리오 별 스위치 손실

2.2.2 스위치 개방 고장 및 계통 불평형 상황의 손실 분석

그림4는 각 시뮬레이션 시나리오별 스위치 손실을 보여준다. 인버터 동작은 스위치 소자의 제어가 지배적이므로 고장에 따른 스위칭 손실 증가가 두드러진다. 상단 스위치의 고장이 늘어날수록 나머지 상단 소자의 손실이 가파르게 상승한다. 2개의 상 고장 시, 나머지 정상 스위치가 그 부하를 모두 감당하게 되면서 손실이 급격하게 증폭됨을 확인할 수 있다. 반면, 3상 모두 개방 시에는 제어 상실로 총손실이 급감한다. 정류기 동작에서는 바디 다이오드의 환류 동작이 지배적이므로, 고장 발생 시 인버터 동작과 달리 도통 손실이 증폭(최대 500% 이상)되어 열적 스트레스를 주도한다. 고장 스위치가 늘어날수록 나머지 상단 소자의 손실이 증가하지만 바디 다이오드로 부하가 분산되면서 총손실의 증가 폭은 상대적으로 낮다. 또한 3상 모두 개방 시 바디 다이오드의 환류 동작으로 인해 손실이 발생한다.

3. 결 론

본 논문은 3상 인버터를 대상으로 단일 및 다중 스위치 개방 고장과 계통 불평형이 복합적으로 발생했을 때 손실 특성을 정량적으로 분석하고 PLECS 시뮬레이션을 통해 교차 검증하였다. 손실 분석을 통해 스위치의 열적 스트레스는 계통 전압 불평형에 의한 스트레스보다 스위치 개방 고장에 따른 스트레스가 더 지배적임을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

[1] Y. Zhang, H. Wang, Z. Wang, Y. Yang and F. Blaabjerg, "Simplified Thermal Modeling for IGBT Modules With Periodic Power Loss Profiles in Modular Multilevel Converters," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 3, pp. 2323-2332, 2019.