

에너지 저장 장치용 3상 4선식 계통연계 양방향 인버터 구성 방법에 따른 비교 및 분석

이원준, 박재광, 안효민, 이병국[†]
성균관대학교 정보통신대학

Loss Comparison and Analysis of 3-phase 4-wire Grid-connected Bi-directional Inverter for Energy Storage System

WonJun Lee, Jae Kwang Park, Hyo Min Ahn, and Byoung Kuk Lee[†]
Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 에너지 저장 장치용 3상 4선식 계통 연계 양방향 인버터의 구성 방법에 따른 특성을 비교 분석 한다. 3상 4선식 인버터의 N상을 DC 링크 중성점 결선, 추가적인 전력 반도체 스위치를 이용하여 결선하는 방법, 그리고 변압기를 이용한 결선 방법에 따른 특성을 비교 및 분석을 한다.

1. 서 론

에너지 저장 장치 (Energy storage system; ESS)에 사용되는 인버터로 평형 3상 부하에 대하여는 3상 3선식 인버터로 사용이 가능하다. 하지만 상전압을 필요로 하는 부하가 추가로 연결 될 경우 3상 4선식으로 인버터 구성이 필요하다. 3상 4선식 인버터의 구성 방법은 그림 1과 같다. N상을 DC 전원의 중성점을 이용하여 연결한 DC Link 중성점 연결형, N상도 스위치를 따로 이용하는 4 leg 형, Δ Y변압기로 연결한 변압기 결선형이 있다.

기존 에너지 저장장치용 3상 4선식 계통연계 인버터와 관련된 연구는 구성방법에 따른 인버터의 특성 비교를 자세하게 수행하지 않았다.^[1] 따라서 본 논문은 실제 인버터 사양에 맞는 전격 반도체 소자와 필드 자성체를 고려하여 충전 모드, 방전 모드, 단독 운전 모드를 비교 및 분석하고 시뮬레이션을 통하여 타당성을 검증한다.

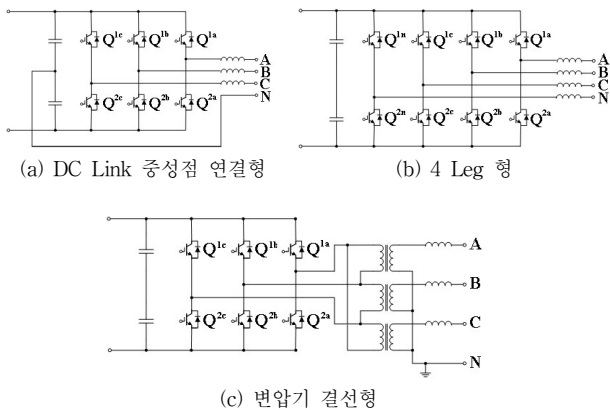


그림 1 N상 구성방법에 따른 3상 인버터 구조
Fig. 1 Configuration of 3 phase inverter by N-phase.

2. 3상 4선식 인버터

2.1 N상 구성방법에 따른 인버터

3상 4선식 인버터의 경우 N상의 구성방법에 따라 그림 1과 같이 DC Link 중성점 연결형, 4 Leg 형, 변압기 결선형이 있다. DC Link 중성점 연결형의 경우 다른 구성 방법에 비해 사용되는 소자의 수가 적어서 추가적인 손실이 적다. 하지만 N상의 전류 제어가 불가능하다는 단점이 있다. 또한 부하가 중성점과 연결 되었을 경우 커패시터가 부하 전류까지 감당해야 한다는 단점이 있다. 4 Leg 형의 경우 N상에 위치한 소자 2개를 통해 N상의 전류 제어가 가능하나 추가적인 소자가 필요하다는 단점이 있다. 변압기 결선형의 경우 Δ Y변압기로 구성하는 방법이며, 제어가 간단하나 시스템 부피가 커지고 변압기에서의 추가적인 손실이 발생 한다는 단점이 있다. 따라서 이와 같은 특성을 고려하여 3상 4선식 인버터의 결선 방법을 선정 및 설계할 필요가 있다.

2.2 3상 4선식 인버터 손실 분석

IGBT의 손실은 도통 손실(P_{cond})과 스위칭 손실(P_{sw})의 합이며 수식 (1)과 같다. IGBT의 도통 손실(P_{Tnd})과 다이오드의 도통 손실(P_{Dnd})의 평균은 수식 (2), (3)과 같으며, 각각의 손실 평균은 소자에 흐르는 전류에 비례한다. 스위칭 손실은 IGBT 스위칭 손실(P_{Tsw})과 다이오드의 스위칭 손실(P_{Dsw})의 합이며 손실 평균은 수식 (4), (5)과 같다.^[2]

$$P_{aw} = \frac{1}{T_0} \sum (E_{cond} + E_{on} + E_{off}) = P_{cond} + P_{sw} \quad (1)$$

$$P_{Tnd} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} V_{ce}(t) i(t) + r_{ce} i(t) \tau(t) dt \quad (2)$$

$$P_{Dnd} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} V_{diode} i(t) + r_{diode} i(t) \tau(t) dt \quad (3)$$

$$P_{Tsw} = \frac{1}{\pi} F_{sw} (E_{on} + E_{off}) \quad (4)$$

$$P_{Dsw} = \frac{1}{\pi} f_{sw} E_{rec} (I_{nom}) \frac{I_{aw}}{I_{nom}} \frac{V_{dc}}{V_{nom}} \quad (5)$$

표 1 3상 계통연계 양방향 인버터 사양 및 소자 선정
Table 1 Specifications of the 3-phase grid connected inverter.

시스템 사양			
입력전압	650 [V]	계통 선간전압	380 [V]
정격 전력	10 [kW]	계통 주파수	60 [Hz]
스위칭 주파수	10 [kHz]		
3상 선정소자	Infineon IGBT module FS35R12U1T4		
N상 선정소자	Infineon IGBT module FF50R12RT4		
LC 필터 설계 파라미터			
인덕턴스	2 [mH]	커패시턴스	25 [uF]

2.3 시뮬레이션 결과 분석

인버터 구성 방법에 따른 손실 특성을 시뮬레이션을 통하여 비교 분석을 하였으며 인버터 동작 조건에 따른 손실 양상은 그림 2, 그림 3, 그리고 그림 4와 같다. 그림 2는 충전 모드에서의 손실양상을 나타낸 그래프이다. 충전 모드에서는 다이오드 도통 손실이 IGBT 도통 손실보다 상대적으로 크게 나타난다.

그림 3은 방전 모드에서의 충전 모드와 같은 조건으로 손실 양상을 분석한 그래프이다. 방전 모드에서는 충전 모드와는 반대로 IGBT에서 도통손실이 더 크게 나타난다. 하지만 스위칭 손실의 경우 IGBT 스위칭 시점에서의 전류가 다이오드 스위칭 시점에서보다 더 크기 때문에 충·방전 모드 모두에서 IGBT에서의 스위칭 손실이 다이오드에서의 손실보다 크게 발생한다.

그림 4는 단독 운전 모드에서 충·방전 모드와 동일한 조건으로 손실양상을 분석한 그래프이다. 단독 운전 모드에서는 도통 손실의 비율이 충·방전 모드와 비교하여 상대적으로 크게 나타난다.

단독 운전 모드를 제외한 충·방전 모드에서 DC Link 중성점 연결 방법은 도통 스위치 개수가 4 Leg보다 적고 변압기 결선형에 비해 추가적인 동손 및 철손이 발생하지 않기 때문에 손실이 작다. 변압기 결선형의 손실이 가장 큰을 볼 수 있다. 따라서 실제 변압기를 적용한다면 변압기로 인한 추가적인 손실이 발생할 것이다. 4 Leg 형의 경우 단독 운전 모드에서는 DC Link 중성점 연결형과 손실이 유사하였으나, 충·방전 모드에서 DC Link 중성점 연결형의 손실이 더 작음을 확인할 수 있다. 따라서 스위치 손실만을 고려한다면 DC Link 중성점 연결형이 가장 유리하다. 그러나 N상의 전류 제어 측면을 중요시한다면 4 Leg 형이 유리하다.

3. 결론

본 논문은 N상의 구성방법에 따른 3상 계통연계 양방향 인버터들의 장·단점을 충·방전 모드와 단독 운전 모드에서 부하 조건에 따른 손실양상 측면에서 비교분석하였다. 그 결과 DC Link 중성점 연결형, 4 Leg 형, 변압기 결선형의 순서로 손실이 작은 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 하지만 DC Link 중성점 연결형의 경우 N상의 전류를 제어하지 못해 발생하는 문제점이 존재하고, 변압기 결선형의 경우 변압기 코일로 인해 크기가 커지는 문제점이 존재한다. 이러한 측면을 고려하여 ESS용 3상 4선식 인버터를 설계할 필요가 있다.

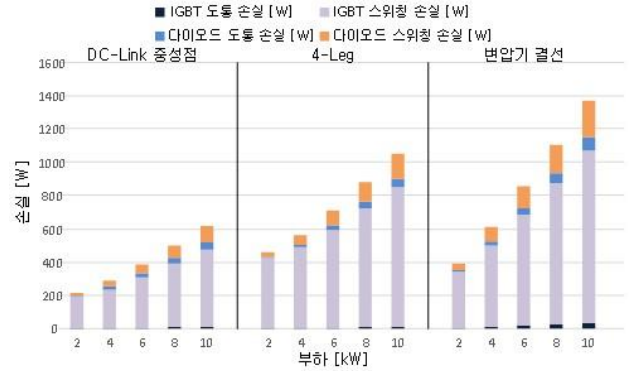


그림 2 충전 모드 동작 손실
Fig. 2 Power losses in charge mode.

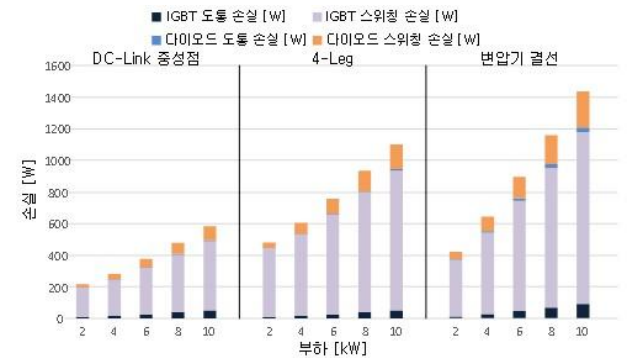


그림 3 방전 모드 동작 손실
Fig. 3 Power losses in discharge mode.



그림 4 단독 운전 모드 동작 손실
Fig. 4 Power losses in stand alone.

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20164030200980)

참고 문헌

- [1] 조수익, 박성준, “전력 손실 평균화 기법에 의한 3상 전압형 인버터의 소손 모드에 관한 연구”, *대한전기학회*, 59권, 3호, 3. 2010. pp. 575-580
- [2] 임석연 외 2인, “120kW급 IGBT 인버터의 열 응답 특성 실시간 모델”, *한국수소및신에너지학회*, 26권, 2호, 4. 2015, pp. 184-191.