

25MW급 대용량 멀티레벨 인버터의 손실해석과 출력특성 비교 분석

김이김*, 박찬배**, 곽상신*
 중앙대학교*, 한국철도기술연구원**

Comparative loss analysis and output characteristic for 25MW class of high power multi-level inverters

Igim Kim*, Chan bae Park**, Sang shin Kwak*
 Chung-ang University*, Korea Railroad Research Institute**

ABSTRACT

멀티레벨 인버터는 낮은 고조파 성분을 갖고, 제한된 정격 스위칭 소자로 대용량 전력변환이 요구되는 시스템에 매우 효율적이다. 수학적 해석방법을 통해 전도손실, 스위칭 손실, 출력 전압 전류의 THD의 해석방법을 제시하고 시뮬레이션을 통해 멀티레벨 인버터의 특성을 비교 분석을 한다. 본 논문은 기존 제안된 멀티레벨 구조인 NPC(Neutral Point Clamped) 멀티레벨 인버터, Cascaded H bridge 멀티레벨 인버터, Flying capacitor 멀티레벨인버터를 기반으로 25MW급 대용량 인버터의 손실 및 출력특성을 비교 분석하였다.

1. 서론

최근 산업현장과 고속 철도 시스템용 전동차 등에서 고전력 장치 사용의 필요성이 증가함에 따라 수 십 MW 이상 급 대용량 인버터에 대한 수요가 늘어나고 있다. 소자를 직렬로 한정된 전력 반도체 스위칭 소자의 용량에 따라 고전압, 고출력의 인버터를 만들기 위해서는 멀티 레벨 인버터의 구조가 가장 적합하다.^[1]

멀티레벨 인버터 구조는 전력반도체 스위치와 다이오드, 커패시터로 구성되며 그림 1과 같이 Neutral Point Clamped(NPC) 멀티레벨 인버터, Cascaded H bridge (CHB) 멀티레벨 인버터, Flying capacitor (FC) 멀티레벨 인버터가 가장 많이 사용되고 있다.

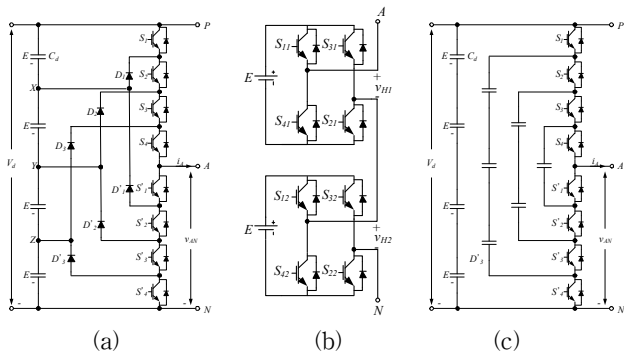


그림 1 5레벨 (a) NPC, (b) CHB, (c) FC 인버터
 Fig. 1 5-level (a) NPC, (b) CHN, (C) FC level inverters

멀티레벨 인버터는 전압 레벨이 증가할수록 저 전압 정격

스위치를 이용하여 고전압 출력 생성이 가능 하며 낮은 dv/dt 를 포함 하는 전압 출력을 만들어 EMI, EMC 특성에 강하다. 또한 정현파에 가까운 매우 낮은 전류출력을 만들 수 있고, 낮은 스위칭 주파수를 사용함에 따라 스위칭 손실을 절감 시킬 수 있다.

각각의 멀티레벨 인버터는 구조와 특징이 다르며, 동일한 고전력 장치에 적용하고자 할 때, 인버터의 출력 특성과 효율분석이 필요하다. 본 논문에서는 전력 반도체 소자로 구성된 멀티레벨 인버터의 효율 분석을 위해, 전력반도체의 전도 손실 분석 방법과 스위칭 손실 분석방법을 통해 시뮬레이션으로 효율 분석을 하였으며, 각각의 멀티레벨 인버터의 구조별 출력 전류의 THD를 비교하였다. 또한 레벨 수를 증가시키기 가장 유리한 구조인 CHB 인버터의 레벨에 따른 효율 분석과 출력 전류의 THD 분석을 하였으며, 3가지 인버터의 5L 멀티레벨 인버터의 구조에서 손실해석과, THD 분석을 하였다.

2. 멀티레벨 인버터의 손실 해석

멀티레벨 인버터의 손실 해석을 위해 멀티레벨 인버터를 구성하는 전력 반도체 Insulated gate bipolar transistor (IGBT) 와 다이오드의 전도 손실 해석과 스위칭 손실 해석이 필요하다. 전력 반도체의 손실 해석은 그림 2과 같은 IGBT와 다이오드의 데이터 시트의 데이터시트의 온 특성 곡선을 이용해 식 (1)에서 IGBT의 온 전압강하 V_{CE} 를 컬렉터 전류의 함수로 표현할 수 있으며, 동일한 방법으로 (2)의 다이오드의 정방향 전압 V_F 를 다이오드의 정방향 전류의 함수로 표현 할 수 있다.^[2]

$$P_{cond}^{IGBT} = \frac{1}{T} \int V_{CE} \cdot I_C dt \quad (1)$$

$$P_{cond}^{DIODE} = \frac{1}{T} \int V_F \cdot I_F dt \quad (2)$$

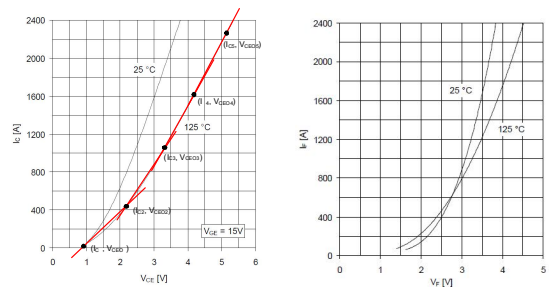


그림 2 IGBT의 온특성 곡선과 정방향 특성곡선
 Fig. 2 On and forward characteristic of IGBT and Diode

$$V_{CE} = \begin{cases} V_{CE01} + R_{IGBT1}I_C & \text{if } I_C < I_{C2} \\ V_{CE02} + R_{IGBT2}(I_C - I_{C2}) & \text{if } I_{C2} \leq I_C < I_{C3} \\ V_{CE03} + R_{IGBT3}(I_C - I_{C3}) & \text{if } I_{C3} \leq I_C < I_{C4} \\ V_{CE03} + R_{IGBT3}(I_C - I_{C4}) & \text{if } I_{C4} < I_C \end{cases} \quad (3)$$

데이터 시트의 특성곡선을 수식 (3)과 같이 구분별로 선형화하여 전도 손실을 전류의 대한 함수로 나타 내어 손실 해석을 할 수 있으며, 스위칭 손실도 스위칭 소자의 on 에너지와 off 에너지 곡선을 이용하여 해석할 수 있다.

3. 시뮬레이션 결과

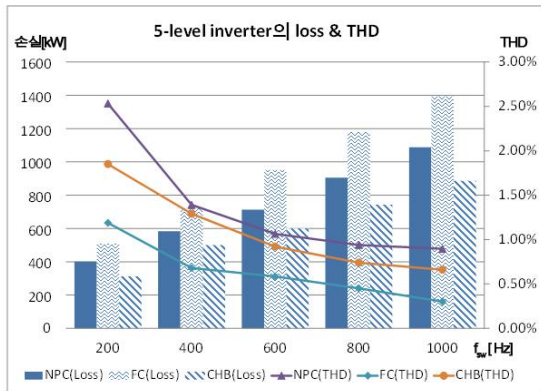


그림 3 5레벨 멀티레벨 인버터의 스위칭 주파수에 따른 손실과 THD비교

Fig. 3 Comparison of losses and THD as a function of switching frequency between 5-level inverters

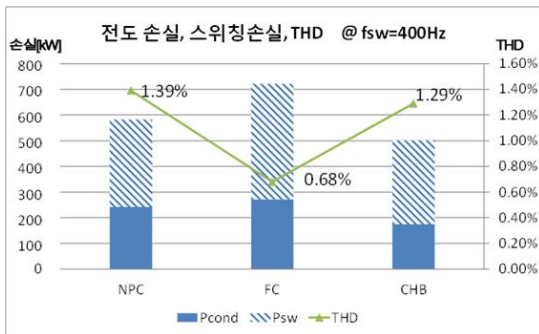


그림 4 5레벨 멀티레벨 인버터의 전도, 스위칭 손실

Fig. 4 Comparison of conduction and switching losses of 5-level inverters

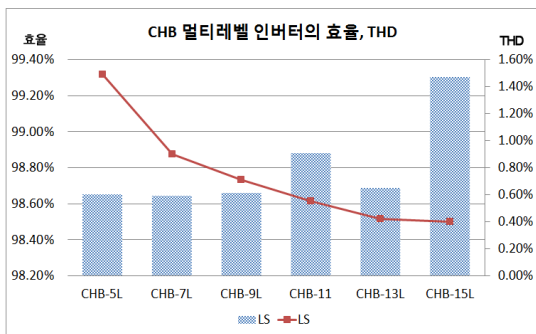


그림 5 CHB 멀티레벨 인버터의 레벨에 따른 효율, THD

Fig. 5 Comparison of efficiency and THD according to

level of CHB inverters.

시뮬레이션에서 사용된 소자는 ABB사의 IGBT 모델 5SNA1200G450350 (4.5kV, 1200A), 5SNA1500E330305 (3.3kV, 1500A) 이다. 그림 3은 5레벨 NPC, FC, CHB 멀티 레벨 인버터의 스위칭 주파수에 따른 손실 해석과 THD로 레벨 수 증가에 따라 손실이 증가하며 THD는 감소하는 것을 볼 수 있다. 그림 4는 스위칭 주파수 400Hz에서 멀티레벨 인버터의 전도 손실과 스위칭 손실, THD 이며, 전도 손실보다 스위칭 손실이 더 많이 차지하는 것을 알 수 있다. 그림 5는 CHB 멀티레벨 인버터의 레벨 수 증가에 따른 효율과 THD를 분석한 것으로 레벨 수 증가에 따라 THD가 감소하는 것을 볼 수 있으며, CHB의 레벨수가 늘어남에 따라 토폴로지의 스위치의 개수는 늘어나지만, 정격 전압이 낮아져, 전체 스위치 개수는 11레벨에서 오히려 감소하여 효율이 증가하고, 가장 낮은 정격 스위치를 사용한 15레벨 CHB 인버터는 가장 좋은 효율을 나타낸다.

4. 결론

본 논문에서는 멀티레벨 인버터의 종류에 따라 출력 특성과 손실 분석을 하였다. 스위칭 주파수 증가에 따른 스위칭 손실의 증가로, 모든 멀티레벨 인버터의 손실은 증가하였으며, 멀티레벨 인버터의 효율은 FC 멀티레벨 인버터가 가장 낮게 분석되었지만, FC의 THD는 가장 낮게 측정되었다. 또한 레벨 수를 증가시키기 가장 유리한 구조인 CHB 인버터의 레벨에 따른 효율 분석과 출력 전류의 THD 분석을 하였으며, 15레벨 CHB 인버터가 가장 높은 효율을 나타냈고, 레벨 수 증가에 따라 THD가 감소하는 것을 확인하였다.

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원 (2014R1A2A2A01006684) 및 한국철도기술연구원의 “레일방식 초고속철도 핵심 기술 개발” 과제의 지원을 받아 수행한 연구임.

참고 문헌

- [1] B.P. McGrath, D.G. Holmes, "Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters," IEEE Trans. on, Industrial Electron., vol. 49, no. 4, Aug. 2002.
- [2] F. Blaabjerg, U. Jaeger, S. M. Nielsen, and J. K. Pedersen, "Power losses in PWM VSI inverter using NPT or PT IGBT devices," IEEE Trans. on, Power Electron., vol. 10, no. 3, pp. 358-367, May. 1995.