

모델 예측 제어 기반 9레벨 H-bridge 멀티레벨 인버터 스위칭 패턴 분석 분석과 셀 밸런싱

김이김*, 박찬배**, 곽상신*
중앙대학교*, 한국철도기술연구원**

Switching pattern analysis and cell balancing of model predictive control based 9-level H-bridge multilevel converter

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

ABSTRACT

멀티 레벨 인버터는 높은 출력 전압을 갖으며, 낮은 THD(Total harmonic distortion)를 요구하는 시스템에 적합하다. 그 중 cascaded H bridge 멀티레벨 인버터는 H bridge 셀 별 관리가 쉽고, 레벨 수를 증가시키기 쉽다는 장점 때문에 많이 이용되어 왔다. 본 논문에서는 cascaded H bridge 인버터의 기존 PI (proportional integral) 제어 기반 PWM (pulse width modulation) 기법의 스위칭 패턴과 모델 예측 제어의 스위칭 패턴을 비교하고 모델예측 제어 시 셀 별 스위칭 패턴 균형을 위한 방법을 제안한다.

1. 서 론

한정된 스위칭 소자의 용량에서 대용량 전동기를 구동하기 위해 고 출력 전압과 고용량의 멀티레벨 인버터가 필요하다. 최근 고압 인버터 시장에서 가장 많이 사용된 그림 1과 같은 CHB 멀티레벨 인버터는 셀별로 독립 전압원이 필요하고 이를 위해 사용된 H bridge cell 개수만큼 정류기가 필요하다는 단점이 있으나 단상 H bridge cell이 직렬연결된 구조로써 완전한 모듈화가 가능하고 모듈 단위 설계에 따라 구성변화가 용이하며 개별 cell 고장 발생 시 연속운전이 가능하고 고장 대처에 용이하다. 또한 클램프 다이오드와 부가적인 커패시터의 사용이 필요 없는 구조라는 장점이 있어 대용량 인버터에 가장 많이 쓰이는 구조이다.

일반적으로 CHB 멀티레벨 인버터를 제어하기 위해서는 선형 PI 제어기반 멀티 캐리어를 이용한 펄스폭 변조 방식(PWM)을 사용한다. 멀티 캐리어를 이용한 펄스폭 변조 방식은 크게 레벨시프트 방식과 위상시프트 방식으로 나눌 수 있으며, 그림 2와 같은 레벨시프트 방식 중 같은 위상과 크기를 갖는 캐리어를 phase disposition (PD) 방식은 출력 선간 전압의 고조파 왜곡률이 낮아 CHB 제어에 가장 적합한 PWM 방식이다^[1]. 그러나 PD 방식은 각 H bridge 셀 간의 스위칭 패턴이 상이하여 IGBT의 스위칭 주파수 불균형과, 손실 불균형, 셀 간 파워 소모의 불균형을 가져와 불균형한 스위칭 디바이스의 열화가 발생한다. 이러한 단점을 극복하기 위해 멀티 캐리어 기반 PWM에서 캐리어 순환 기술 또는 캐리어 재배치 방법을 통해 H bridge 셀 간 스위칭 디바이스의 스위칭 주파수의 균형을 맞춘다^[2]. 그러나 모델 예측 제어에서는 스위칭 디바이스의 불균형 발생 시 캐리어 순환 방법을 사용할 수 없으며

로, 본 논문에서는 모델 예측기반 H bridge 셀의 스위칭 패턴의 불균형에 대해 분석하고, 셀 밸런싱 방법을 제안한다.

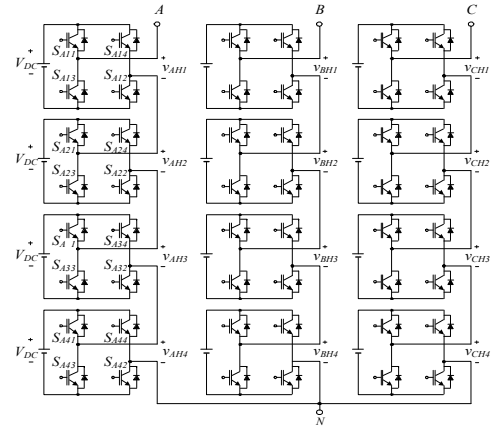


그림 1 9레벨 CHB 멀티레벨 인버터 구조
Fig. 1 Structure of a nine-level cascaded H-bridge inverter

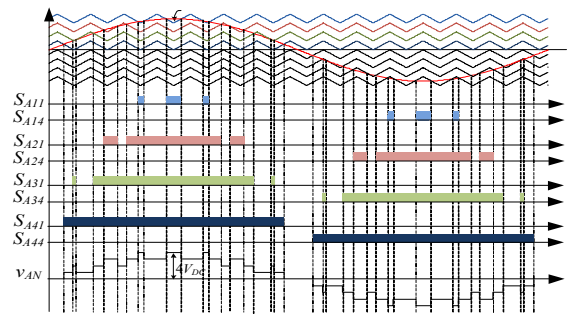


그림 2 9레벨 CHB 멀티레벨 인버터의 주요 파형
Fig. 2 Key waveforms of a 9-level CHB inverter

2. 모델 예측 제어 기반 CHB 멀티레벨 인버터의 스위칭 밸런싱

2.1 모델 예측 제어 CHB 멀티레벨 인버터 시스템

최근 새로운 전류 제어 방식으로 많은 인버터 구조에 적용되어 연구되어 온 모델 예측 제어 방식은 빠른 동특성을 갖는 특성이 있으며 비선형 시스템에 쉽게 적용 가능하다는 장점이 있다. 그러나 모델 예측 제어를 위해서는 빠른 샘플링 타임을 갖는 제어기를 사용하여야 하며, 특히 멀티레벨 인버터에 적용하는 경우, 레벨 수에 따라 기하급수적으로 늘어나는 스위칭

상태와 전압 벡터에 따라 실시간 계산이 불가능하므로, 오프라인에서 look up table에 의해 최적화된 스위칭 상태를 정의하여야 한다. 이에 따라 모델 예측제어 기반의 CHB 멀티레벨 인버터에 모든 스위칭 상태를 사용할 수 없고, 스위칭 불균형이 일어나게 된다^[3].

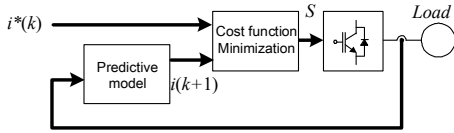


그림 3 모델 예측 제어 알고리즘의 블럭도
Fig. 3 Block diagram of the model predictive algorithm

2.2 스위칭 순환 방식을 통한 스위칭 밸런싱

모델 예측제어 기반 CHB 멀티레벨 인버터의 스위칭 패턴의 밸런싱을 위해 아래 그림 4와 같은 스위칭 순환 방식이 사용되었다. 출력 전압의 한 주기동안 9레벨 CHB 기준 4개의 H bridge 셀의 스위칭 패턴을 한 번씩 회전시켜 평균 스위칭 개수의 균형을 맞출 수 있다.

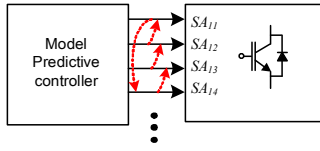


그림 4 스위칭 순환 방식 알고리즘
Fig. 4 switching rotation algorithm

3. 시뮬레이션 결과

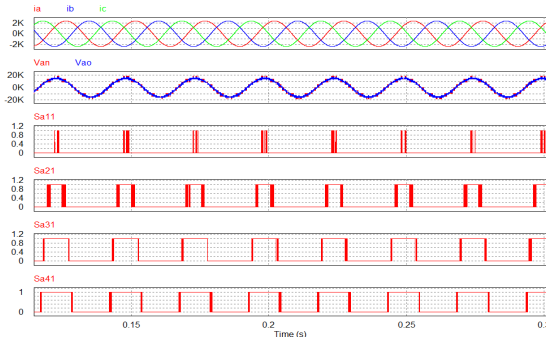


그림 5 스위칭 순환 미적용 시 9레벨 CHB 인버터 주요 파형
Fig. 5 key waves of 9-level CHB inverter without switching rotation

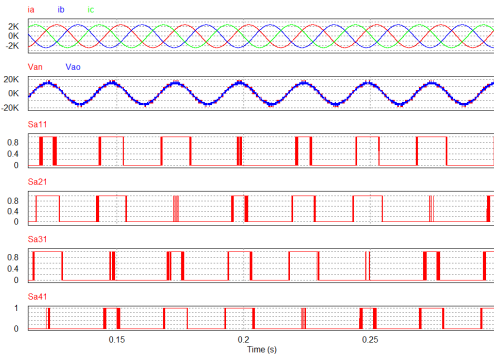


그림 6 스위칭 순환 적용 시 9레벨 CHB 인버터 주요 파형
Fig. 6 key waves of 9-level CHB inverter applied switching rotation

시뮬레이션은 저항 0.5Ω, 인덕터 19.5mH의 3상 R L 부하를 사용하였고, 동작주파수 39.6 Hz에 기준단자 전압 21 kV와 단자전류 2400A의 대용량 인버터이다. 그림 4는 모델 예측 제어를 통한 9레벨 CHB 멀티레벨 인버터의 출력 전류파형과 상전압 파형을 나타내고 있으며 각 H bridge 셀의 첫 번째 스위치 S_{Ajl} ($j=1,2,3,4$)의 스위칭 신호 패턴이 불균형함을 보여준다. 그림 5는 제안된 스위칭 순환 방식을 적용한 모델 예측 제어 9레벨 CHB 출력 파형과 스위치 신호이며, 각 셀의 첫 번째 스위치 패턴이 한 주기 별로 순환하는 것을 볼 수 있다.

표 1은 스위칭 순환 방식 적용여부에 따른 각 셀의 스위칭 디바이스의 스위칭 주파수와 셀 소모 전력을 나타낸 것으로 스위칭 순환 방식을 적용 시 각 H bridge 셀의 첫 번째 스위치 S_{Ajl} 의 평균 스위칭 주파수가 동일하게 균형을 이루는 것을 확인할 수 있다. 한 H bridge 셀에서 소모하는 전력도 균일 하게 소모 되는 것을 확인 할 수 있다.

표 1 스위칭 순환 적용여부에 따른 스위칭 주파수와 Cell 소모 전력
Table 1 Switching frequency of devices and cell power consumption by switching rotation technique.

알고리즘 미적용	Cell ₁	Cell ₂	Cell ₃	Cell ₄
스위칭 주파수 (S_{ajl}) [Hz]	214	459	222	261
Cell 전력 [MW]	0.2	2.3	2.9	3.0
알고리즘 적용	Cell ₁	Cell ₂	Cell ₃	Cell ₄
스위칭 주파수 (S_{ajl}) [Hz]	289	289	289	289
Cell 전력 [MW]	2.1	2.1	2.1	2.1

4. 결론

본 논문에서는 모델 예측제어 기반 CHB 멀티레벨 인버터의 스위칭 밸런스 방법에 대해 제안하였다. 제어기의 출력 스위칭 신호를 순환시켜 주는 간단한 방법을 통해 멀티 캐리어 기반이 아닌 모델 예측제어 기반 CHB 멀티레벨 인버터의 스위칭 디바이스의 스위칭 주파수를 균일하게 하였으며, 셀 소모 전력이 균형을 이루는 것을 확인하였다.

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

참고 문헌

- [1] Z. Xu, R. Li, H. Zhu, D. Xu, Z. C.H., "Control of Parallel Multiple Converters for Direct Drive Permanent Magnet Wind Power Generation Systems," IEEE Trans. on Power Electron., vol. 27, no. 3, pp. 1259-1270, 2012, March.
- [2] X. Shi, Z. Wang, T. L.M., W. F., "A comparison of phase disposition and phase shift PWM strategies for modular multilevel converters," Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013 IEEE pp.4089-4096, 2013, Sept.
- [3] P. Cortes, A. Wilson, S. Kouro, J. Rodriguez, H. Abu Rub, "Model Predictive Control of Multilevel Cascaded H Bridge Inverters," IEEE Trans. Industrial Electron., vol. 57, no. 8, pp.2691-2699, 2010, Aug.