

# CHB 멀티레벨 인버터를 위한 최적 모델 예측 제어

노 찬\*, 곽상신\*  
 중앙대학교

## Optimization of Model Predictive Control for Cascaded H-bridge Multilevel Inverter

Roh Chan\*, Sang-Shin Kwak\*  
 Chung-ang University\*

### ABSTRACT

최근 멀티레벨 인버터가 high power and medium voltage에 많이 사용되면서 레벨 증가가 비교적 쉬운 CHB 구조가 많이 사용되고 있다. 멀티레벨 인버터에서 모델 예측 제어를 사용하면 빠른 동특성을 얻을 수 있지만 레벨 증가에 따른 계산량이 급격하게 증가하는 단점을 갖는다. 그래서 본 연구에서는 정상상태에서 기준 전압 벡터의 인근 벡터만 고려하여 계산량을 감소시키고 과도상태에서 최적화 기법을 통한 빠른 동특성을 유지하는 최적 모델 예측 제어를 제안한다. 본 논문에서는 5-level CHB 인버터를 이용하여 시뮬레이션을 진행하고 기존 모델 예측 제어와 제안하는 알고리즘의 성능을 비교한다.

### 1. 서 론

최근 멀티레벨 인버터는 고속철도시스템, 신재생에너지시스템 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 2-레벨 인버터랑 비교했을 때, 멀티레벨 인버터는 THD(Total harmonic distortion), EMI(Electromagnetic Interference) 그리고 스위칭 스트레스 측면에서 뛰어난 성능을 보여준다. 멀티레벨 인버터중 비교적 레벨 증가가 쉬운 CHB 구조가 많이 사용되고 있는데, CHB 멀티레벨 인버터를 위해 기존에는 level-shifted PWM 그리고 phase-shifted PWM 등과 같은 방법들이 사용되어 왔다<sup>[1]</sup>. 하지만 microprocessor의 발전에 따른 새로운 전류 제어 방식인 모델 예측 제어가 최근에 많이 사용되고 있는데, 이는 구현의 용이성 및 빠른 동특성을 제공한다<sup>[2]</sup>. 모델 예측 제어는 인버터가 만들 수 있는 모든 미래 전류를 시스템 모델을 사용해 예측하고, 기준 전류와 가장 가까운 예측 전류를 만드는 최적의 스위칭 상태를 선택한다. 이러한 동작 특성 때문에 모델 예측 제어는 CHB 인버터의 레벨이 증가할수록 계산량이 급격하게 증가하게 된다. 그래서 본 논문에서는 출력 전류 성능에 영향을 주지 않고 계산량을 감소시킬 수 있는 최적의 모델 예측 제어를 제안한다. 정상상태와 과도상태를 구분하여 CHB 멀티레벨 인버터를 분석하였고, 이를 통해 정상상태에서 기준 전압 벡터의 인근 벡터만 고려하여 계산량을 감소시키고 과도상태에서 최적화 기법을 통한 빠른 동특성을 유지하는 최적 모델 예측 제어를 구현하였다. 결론적으로, 제안하는 모델 예측 제어는 기존 모델 예측 제어와 비교하여 출력 전류 성능에 영향 없이 계산량을 크게 감소시켰다. 제안하는 방법은 5-레벨 CHB 멀티레벨 인버터의 시뮬레이션을 이용해 증명하였다.

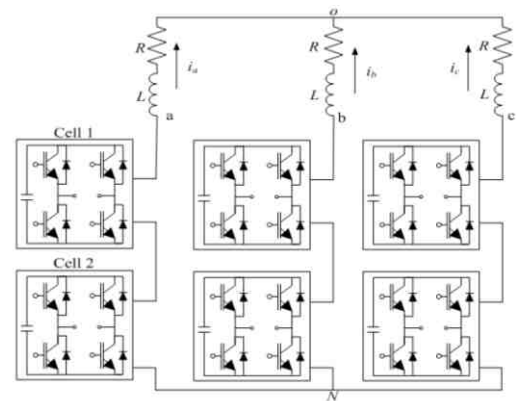


그림 1 3상 5-레벨 CHB 멀티레벨 인버터 구조  
 Fig. 1 Structure of 3-phase 5-level CHB multilevel inverter

### 2. CHB 멀티레벨 인버터를 위한 최적의 모델 예측 제어

#### 2.1 CHB 인버터를 위한 기존 모델 예측 제어

그림 1은 3상 5-레벨 CHB 멀티레벨 인버터의 회로를 나타낸다. 5-레벨 CHB 인버터는 1상이 2개의 Cell로 구성되고 각 셀은 직렬로 연결되어 있다. 1개의 Cell은 4개의 스위칭 소자로 구성된 Full-bridge 인버터로 구성되어 있다. 모델 예측 제어는 출력 전류를 discrete-time domain에서 나타내면 다음과 같은 예측 전류를 얻을 수 있다.

$$i_{\alpha\beta}(k+1) = i_{\alpha\beta}(k) + \frac{T}{L}(v_{\alpha\beta}[k] - R^*i_{\alpha\beta}(k)) \quad (1)$$

계산된 예측 출력 부하 전류는 다음에 나타난 비용함수를 통해 최적의 스위칭 상태를 만든다.

$$G = |i_{\alpha}^*(k+1) - i_{\alpha}(k+1)| + |i_{\beta}^*(k+1) - i_{\beta}(k+1)| \quad (2)$$

기존 모델 예측 제어는 모든 전압 벡터를 고려해서 식(1)에 나타난 예측 출력 전류를 만들기 때문에 계산량이 증가하게 된다. 다음 표 1은 레벨에 따른 전압 벡터의 개수를 나타낸다.

표 1 레벨에 따른 CHB 인버터의 전압 벡터 개수  
 Table 1 Number of voltage vectors according to level

Level	5	7	9
total vectors	125	343	729
non-redundant vectors	61	127	217

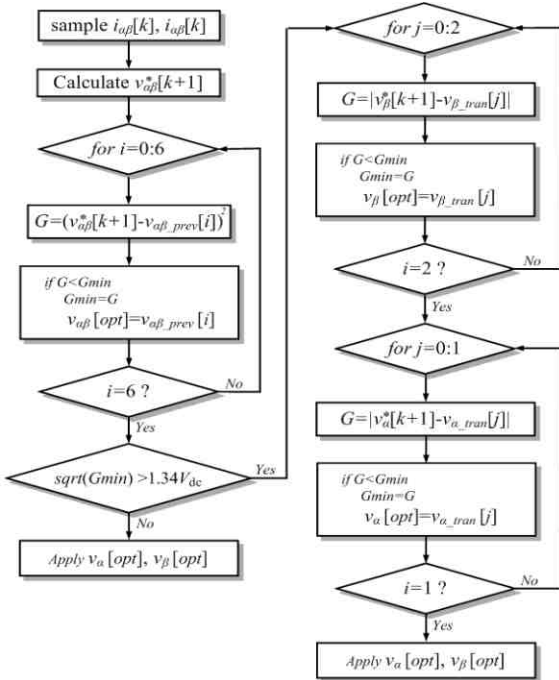


그림 2 제안하는 모델 예측 제어의 flowchart  
Fig. 2 Flowchart of proposed MPC method

## 2.2 CHB 인버터를 위한 제안하는 모델 예측 제어

### 2.2.1 제안하는 알고리즘의 정상상태

제안하는 모델 예측 제어는 정상상태에서 전 스텝 최적 벡터의 인근 벡터만 고려한다. 이는 정상상태에서 기준 전압의 주파수는 샘플링 주파수보다 매우 느려서 거의 변화가 없다고 가정할 수 있기 때문이다. 제안하는 알고리즘은 레벨에 상관없이 2-레벨 인버터처럼 정상상태에서는 7개의 전압 벡터만 고려하면 되기 때문에 계산량을 감소시킬 수 있다.

### 2.2.2 제안하는 알고리즘의 과도상태

제안하는 모델 예측 제어는 정상상태에서 인근 벡터만 고려하기 때문에 과도상태가 발생하면 과도응답 속도가 늦을 수 있다. 그림 2는 제안하는 알고리즘의 flowchart를 나타낸다. 그림 2에 나타난 것처럼 제안하는 알고리즘은 과도상태에서 일정 오차를 초과하면 인근 벡터가 아니라 미리 정의된 6개의 전압 벡터를 고려하게 된다. 미리 정의된 6개의 벡터는 2-스텝 오차안으로 기준 전압 벡터를 찾아갈 수 있는 최적의 포인트이다. 또한 최적 벡터로 빠르게 수렴할 수 있도록 제안하는 알고리즘은 최적화 기법인 univariant method를 적용하였다. 이는 6개의 포인트를 5번 안에 찾아갈 수 있도록 한다. 이는 빠른 과도응답 뿐 아니라, 계산량 역시 감소시킬 수 있다.

## 3. 시뮬레이션

제안하는 모델 예측 제어를 검증하기 위해  $V_{dc} = 40 V$ ,  $T_{sp} = 200 \mu s$ 의 조건에서  $R-L$  부하( $R = 20 \Omega$ ,  $L = 15 mH$ )를 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션은 5-레벨 CHB 인버터에서 기존 방법과의 비교를 통해서 진행하였다. 그림 3은 정상상태에서 기존 모델 예측 제어 방법과 제안하는 방법의 전류 파형 및 a-상 출력 전압을 나타낸다. 제안하는 방법은 계산량이 감소했지만 기존 모델 예측 제어와 같은 성능의 전류

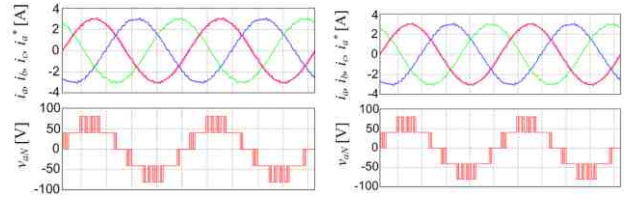


그림 3 제안하는 방법의 정상상태 출력 전류, a상 전압 파형  
Fig. 3 Output current, a-leg voltage of proposed method during steady state.

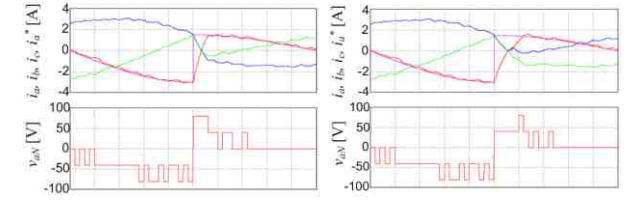


그림 4 제안하는 방법의 과도상태 출력 전류, a상 전압 파형  
Fig. 4 Output current, a-leg voltage of proposed method during transient state.

파형을 나타낸다. 그림 4는 과도상태에서 기존 모델 예측 제어와 제안하는 방법의 전류 파형 및 a-상 출력 전압을 나타낸다. 제안하는 방법은 과도상태에서도 계산량을 많이 감소시키지만, 과도응답에는 거의 영향을 주지 않는다.

표 2 기존 및 제안하는 방법의 DSP 수행시간

Table 2 DSP execution times of conventional/proposed method

	기존 알고리즘	제안하는 알고리즘
정상상태	98.92 [ $\mu sec$ ]	20.17 [ $\mu sec$ ]
과도상태	98.92 [ $\mu sec$ ]	15.17 [ $\mu sec$ ]

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2017R1A2B4011444)

## 4. 결론

제안하는 모델 예측 제어는 정상상태/과도상태의 분석을 통해 멀티레벨 CHB 인버터의 계산량을 감소시킨다. 기존 모델 예측 제어보다 제안하는 모델 예측 제어는 정상상태/과도상태에서 80 % 이상의 계산량 감소를 확인할 수 있다.

## 참고 문헌

- [1] G. Farivar, B. Hredzak, and V. G. Agelidis, "A DC-Side sensorless Cascaded H-Bridge Multilevel Converter-Based Photovoltaic System" *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 7, pp. 4233-4241, 2016
- [2] Y. Zhang, X. Wu, X. Yuan, Y. Wang and P. Dai, "Fast Model Predictive Control for Multilevel Cascaded H-Bridge STATCOM With Polynomial Computation Time," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 8, pp. 5231-5243, 2016.