

# CB-MPC 기법 적용 3레벨 NPC 인버터의 전류 제어 방법

남은택, 채수용  
포항공과대학교

## Current Control of Three Level NPC Inverters based on CB-MPC

Euntaek Nam, Suyong Chae  
Pohang University of Science and Technology

### ABSTRACT

본 논문은 그리드 팔로잉 모드에서 3레벨 중성점 클램핑 (3L-NPC) 전압원 인버터(VSI)의 그리드 주입 전류 제어를 위해 새로운 반송파 기반의 모델 예측제어(CB-MPC) 알고리즘을 제안한다. 기존의 유한 제어요소 모델 예측제어(FCS-MPC)는 변조 신호가 필요하지 않지만, 이로 인해 스위칭 주파수가 가변되어 인버터의 출력 필터 설계가 어려워지는 문제점이 있다. 제안한 방법은 인버터의 스위칭 주파수를 고정함으로써 기존 FCS-MPC가 가진 문제점을 개선하고, 비용함수 평가를 위한 알고리즘 내 루프 반복을 최소화하여 최적의 전압 벡터를 추정한다. 제안된 알고리즘의 동작 성능은 실시간 시뮬레이션 시험을 통해 검증하였다.

### 1. 서론

Finite Control Set(FCS)-Model Predictive Control(MPC)는 주어진 입력에 대해 제어되는 변수의 미래 동작을 예측하기 위해 시스템 모델을 사용하는 강력한 디지털 제어 기법이다. FCS-MPC는 매우 직관적이고, 구현이 쉬우며 정밀한 모델과 복잡한 매개변수 설계를 필요로 하지 않는다는 점에서 다양한 응용 분야의 전력변환기 제어에 사용되고 있다. 또한, 최근 신재생 에너지원과 마이크로그리드의 활용이 증가함에 따라 Voltage Source Inverter(VSI)의 그리드 주입 전류를 제어하기 위해 다양한 MPC 방법들이 제안되었다.<sup>[1]</sup>

FCS-MPC 알고리즘은 크게 미래 동작 예측과 비용함수 평가 기반의 최적화로 구성된다. VSI의 전류 제어 시, 제어 변수들의 미래 동작은 인버터의 유한한 스위칭 상태를 기반으로 예측되고, 이에 대한 비용함수가 평가되며, 마지막으로 가장 최적의 시퀀스를 VSI에 적용한다. 기존의 FCS-MPC는 제어 시 변조 신호가 필요하지 않기 때문에 빠른 동적 응답 특성을 가진다는 장점이 있다. 하지만, 이로 인해 가변 스위칭 주파수가 발생하는 단점이 있고, 이는 VSI의 출력 필터 설계를 어렵게 만들며, 스위칭 손실 증가 및 전력 품질의 감소로 이어진다. 이러한 단점을 해결하기 위해, 지난 몇 년간 FCS-MPC의 스위칭 주파수를 고정시키는 방법들이 제안되었다.<sup>[2]</sup>

기존의 연구에서 제안된 변조 모델 예측제어(MMPC) 기법은 공간벡터 변조 기법을 이용하여 스위칭 주파수를 고정시킨다. 또한, 가상의 공간벡터를 활용하여 일정한 스위칭 주파수를 유지하면서 VSI 출력 전류의 왜곡을 줄이는 방법들이 제안되

고 있다. 하지만, 대부분의 MMPC 방법은 인버터의 스위칭 상태 시간 간격을 계산해야 한다는 점에서 디지털 신호 처리장치(DSP)의 연산 부담을 증가시킨다. 최근, 공간벡터 변조 기법과 동일한 성능을 나타낸다는 점에서 반송파 기반의 MMPC(CB-MMPC) 방법이 제안되고 있다.<sup>[3]</sup> CB-MMPC는 스위칭 상태를 출력하기 위해 변조 신호를 삼각 반송파와 비교하며, VSI의 스위칭 주파수를 고정시킬 뿐만 아니라 DSP의 연산 부담을 줄일 수 있다.

본 연구에서는 스위칭 주파수를 고정하기 위한 새로운 반송파 기반 모델 예측제어(CB-MPC) 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 비용함수의 도함수를 이용하여 제어 알고리즘의 루프 반복을 최소화하고, 스위칭 주파수를 고정시킨다. 알고리즘은 3레벨 중성점 클램핑 (3L-NPC) VSI에 적용되며, 계통연계 상태에서의 전류 제어를 달성한다. 제안하는 방법은 시뮬레이션 수행을 통해 본 연구의 유효성을 검증한다.

### 2. 본론

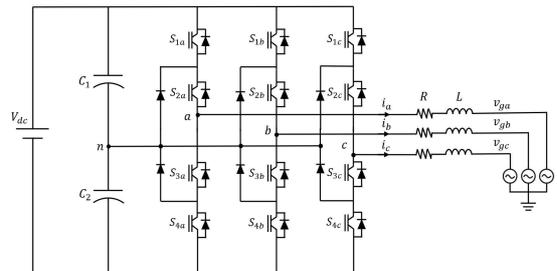


그림.1 3L-NPC (Three-level Neutral-Point-Clamped) 인버터 토폴로지

Fig.1 Topology of 3L-NPC (Three-level Neutral-Point-Clamped) Inverter

표 1. 3L-NPC 인버터 스위칭 상태  
Table 1. 3L-NPC inverter switching states

$S_x$	$S_{1x}$	$S_{2x}$	$S_{3x}$	$S_{4x}$	$v_{xn}$
1	1	1	0	0	$\frac{V_{dc}}{2}$
0	0	1	1	0	0
-1	0	0	1	1	$-\frac{V_{dc}}{2}$

## 2.1 3L-NPC 인버터

3L-NPC 인버터는 기존의 2레벨 인버터와 비교할 때 그리드 또는 부하에서 더 낮은 고조파 왜곡을 발생시키고, 스위치의 전압 스트레스를 줄일 수 있어 다양한 응용 분야에서 연구가 되고 있다. 3L-NPC 인버터의 회로는 그림 1과 같이 12개의 스위치와 6개의 클램핑 다이오드로 구성된다. 각 스위치 레그는  $S_x = \{-1, 0, 1\}$  3개의 스위칭 상태를 생성하고, 인버터의 출력전압은 스위칭 상태에 따라  $v_{xn} = \{-V_{dc}/2, 0, V_{dc}/2\}$ 로 생성된다. 표 1은 3L-NPC의 스위칭 상태와 출력전압을 나타내며, 2개의 스위치 쌍이 동시에 도통될 때 인버터가 동작함을 확인할 수 있다.

그리드에 주입되는 전류의 동적 모델은 그림 1의 전류 방향에 따라 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L \frac{di_{abc}}{dt} = v_{abc,n} - Ri_{abc} - v_{g,abc} \quad (1)$$

이때  $R$ 과  $L$ 은 필터 저항과 인덕턴스를 의미하고,  $v_{abc,n}$ 은 인버터의 출력전압을 의미하며,  $v_{g,abc}$ 는 그리드 전압, 그리고  $i_{abc}$ 는 그리드에 주입되는 선전류를 의미한다.

디지털 컨트롤러 기반 제어회로 구현을 위해 그림 1의 동적 모델은 이산시간 영역에서 정의되어야 한다. 연속시간에서  $i_{abc}$ 에 대한 도함수는 샘플링 시간  $T_s$ 에 대해 오일러 방법에 근거하여 식 (2)와 같이 근사할 수 있다.

$$\frac{di_{abc}}{dt} \approx \frac{i_{abc}(k+1) - i_{abc}(k)}{T_s} \quad (2)$$

식 (2)를 이용하여, 식 (1)에 대한 상태 공간 모델을 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{abc}(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right)i_{abc}(k) + \frac{T_s}{L}(v_{abc,n}(k) - v_{g,abc}(k)) \quad (3)$$

## 2.2 FCS-MPC

FCS-MPC는 기존 MPC 알고리즘의 연산 부담을 줄이기 위해 전력변환 컨버터의 디지털 제어에 사용된다. 각 전력변환 컨버터는 유한한 수의 스위칭 상태를 가지며, 비용함수는 최적의 시퀀스를 찾기 위해 미리 결정된 스위칭 상태 수를 이용한다. 그림 1의 경우,  $i_{abc}$ 에 대한 예측은 비용함수에서 기준 전류  $i_{abc,ref}$ 와의 오차를 통해 평가되고, 가장 최소 편차를 생성하는 스위칭 상태  $S_x$ 를 선택하여 그다음 샘플링 시간에 적용한다. 3L-NPC는 총 27개의 스위칭 상태를 가지며,  $k+1$  시점에서의 비용함수  $G$ 는  $i_{abc}$ 와  $i_{abc,ref}$  사이의 오차를 평가하기 위해 식 (4)와 같이 표현된다.

$$G = |i_{abc}(k+1) - i_{abc,ref}(k+1)|^2 \quad (4)$$

디지털 컨트롤러 구현의 연산 지연을 보상하기 위해서는 미래 예측값이  $k+1$ 시점에서 결정되어야 한다. 따라서, 두 단계 예측제어가 적용되고,  $k+2$  시점에서  $i_{abc}$ 의 상태 공간모델은 식 (5)로 정의된다.  $k+1$  시점과  $k+2$  시점에서의  $i_{abc,ref}$ 은 라그랑주 보간법<sup>[4]</sup>을 이용하여 식 (6)과 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{abc}(k+2) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right)i_{abc}(k+1) + \frac{T_s}{L}(v_{abc,n}(k+1) - v_{g,abc}(k+1)) \quad (5)$$

$$i_{abc,ref}(k+1) = 3i_{abc,ref}(k) - 3i_{abc,ref}(k-1) + i_{abc,ref}(k-2) \quad (6)$$

$$i_{abc,ref}(k+2) = 3i_{abc,ref}(k+1) - 3i_{abc,ref}(k) + i_{abc,ref}(k-1) \quad (7)$$

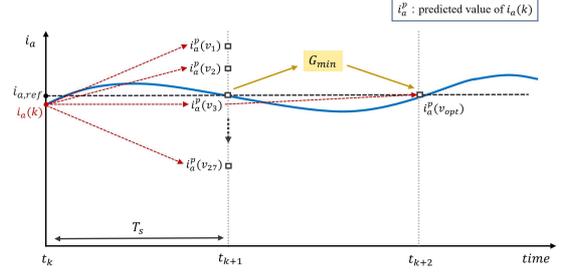


그림.2 비용 함수 최소화 과정 (그리드 주입 전류 제어)

Fig.2 Cost function minimization process (Grid-ingected current control)

## 2.3 CB-MPC 알고리즘

본 연구에서 제안하는 CB-MPC는 기존의 FCS-MPC 알고리즘과 동일한 비용함수 최소화 전략을 이용하며, 전류 제어 시 더 적은 연산 부담이 발생한다. 비용함수 최소화 전략은 그림 2와 같이 유한한 스위칭 상태 수에 따라  $k+1$  시점에서의 전류 예측값을 비용함수로 평가하고, 가장 작은 편차에 해당하는 최적의 전압 벡터를 생성한다. 이후, 27개의 스위칭 상태에 대해 각각의 샘플링 시간마다 평가할 필요 없이  $k+2$  시점에서 비용함수의 도함수가 0이 되도록 전압 벡터를 계산하여 FCS-MPC 알고리즘의 최적화 단계를 단순화한다.<sup>[5]</sup> 그림 2는 CB-MPC의 최적화 프로세스를 나타내며, 비용함수의 도함수를 최소화하는 조건은 식(8)과 같다.

$$\frac{dG_{abc}(v_{abc,n})}{dv_{abc,n}} = 0 \quad (8)$$

CB-MPC는 스위칭 주파수를 고정하기 위해 FCS-MPC의 최적화 프로세스로부터 생성되는 전압 벡터를 제로 시퀀스 신호와 결합하여 새로운 변조 신호  $m_{abc}$ 를 생성한다. 그림 3은 최소 비용함수로부터 최적의 전압벡터  $v_{abc,opt}$ 를 생성하고 스위칭 주파수를 고정시키는 새로운 CB-MPC의 전체 흐름도를 나타내며, 본 연구에서 CB-MPC는 3L-NPC 인버터의 그리드 주입 전류를 제어하기 위해 적용된다.

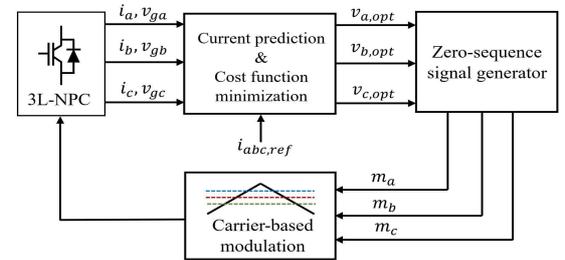


그림.3 제안하는 CB-MPC (Carrier-Based Model Predictive Control)의 제어 전략

Fig.3 Control scheme of the proposed CB-MPC (Carrier-Based Model Predictive Control)

## 2.4 CB-MPC 시뮬레이션 결과

제안하는 새로운 CB-MPC 제어 방법을 실시간으로 검증하기 위해 MATLAB/Simulink 소프트웨어와 실시간 디지털 시뮬레이터(Speedgoat)를 활용하여 실험을 수행하였다. 표 2는

CB-MPC 구현을 위해 설계된 시스템 파라미터를 나타내며, 3L-NPC의 스위칭 주파수와 반송파의 주파수는 18kHz로 설정하였다.

그림 4는 VSI의 3상 그리드 주입 전류  $i_{abc}$ 를 나타내고, 그림 5는 a상에서의 전압 벡터 파형과 스위칭 상태를 나타낸다. 이때 초기 기준 전류  $i_{abc,ref}$ 는 20A로 설정된다.  $i_{abc}$ 는 평형 상태에서  $i_{abc,ref}$ 를 추종하고, 지령의 크기가 14A로 감소하는 상황에서도 정현파 형태를 유지하며 정상적으로 추종하는 것이 관찰된다. 제안된 CB-MPC 방법에 따라 비용함수의 변화량이 최소가 되는 지점의 전압 벡터가 생성되며, 반송파와의 비교를 통해 그림 5의 일정한 스위칭 상태로 유지되는 것을 확인할 수 있다.

표 2. CB-MPC 시스템 파라미터  
Table 2. CB-MPC System parameter

DC Bus Voltage	400 V
Grid voltage(Vrms)	110 V
Filter Inductance	5 mH
Filter Resistance	1 $\Omega$
Sampling Period	28 $\mu$ s

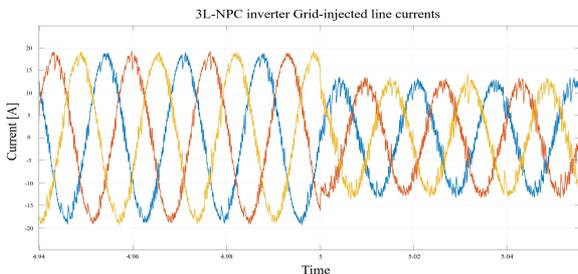
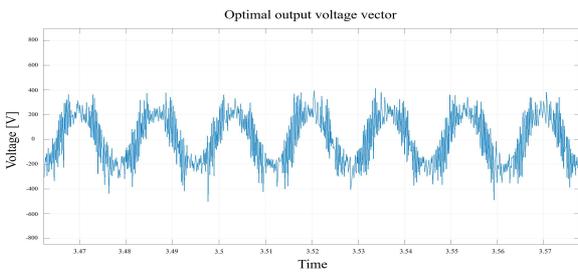
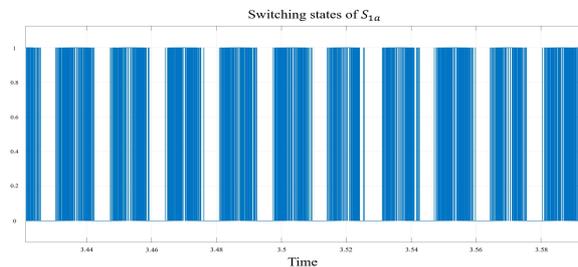


그림.4 정상 상태 구간에서의 3L-NPC 인버터 그리드 주입 전류  
Fig.4 3L-NPC inverter grid-injected current in Steady-state



(a)



(b)

그림.5 a 상에서의 최적 전압 벡터 파형  $v_{a,opt}$  과 스위칭 신호  $S_{1a}$   
Fig.5 Optimal voltage vector waveform  $v_{a,opt}$  and Switching signal  $S_{1a}$  in phase a

### 3. 결론

본 연구는 기존 FCS-MPC의 고정 스위칭 주파수 기반 전류 제어를 위해 새로운 CB-MPC 방법을 제안하였다. 제안하는 방법은 반송파 기반의 변조를 이용하여 스위칭을 주파수를 일정하게 유지시키고, 알고리즘의 연산 부담을 줄이기 위해 비용함수의 도함수를 최소화하는 방법을 분석하였다. 제안하는 방법은 디지털 컨트롤러의 연산 부담을 최소화할 수 있고, 저 사양 CPU에서도 MPC 구현이 가능할 것으로 기대된다.

본 연구는 한국에너지기술연구원의 기본사업(C3-2426)을 재원으로 수행한 연구개발과제의 결과입니다.

### 참 고 문 헌

- [1] Sergio Vazquez, Jose Rodriguez, Marco Rivera, Leopoldo G. Franquelo, and Margarita Norambuena, "Model Predictive Control for Power Converters and Drives: Advances and Trends", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 64, no. 2, pp. 935-947, 2017.
- [2] Yong Yang, Huiqing Wen, and Depeng Li, "A Fast and Fixed Switching Frequency Model Predictive Control with Delay Compensation for Three-Phase Inverters", IEEE access, vol. 5, pp. 17904-17913, 2017.
- [3] Junzhong Xu, et al., "Carrier-Based Modulated Model Predictive Control Strategy for Three-Phase Two-Level VSIs", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 36, no. 3, pp. 1673-1687, 2021.
- [4] Jose Rodriguez, et al., "Predictive Current Control of a Voltage Source Inverter", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 54, no. 1, pp. 495-503, 2007.
- [5] Fadia Sebaaly, Hani Vahedi, Hadi Y. Kanaan, and Kamal AI-Haddad, "Novel Current Controller Based on MPC with Fixed Switching Frequency Operation for a Grid-Tied Inverter", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 65, no. 8, pp. 6198-6205, 2018.