

# 모델 예측 제어 기반의 균형 있는 손실을 갖는 단상 3-레벨 중성점 다이오드 클램프(NPC) 컨버터

노 찬\*, 곽상신\*  
 중앙대학교\*

## Power Loss Balancing of Single-Phase Three-Level Neutral Point Clamped(NPC) Converter based on Model Predictive control

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

### ABSTRACT

3 레벨 중성점 다이오드 클램프(NPC) 컨버터는 high power medium voltage(MV)에서 많이 응용된다. 하지만 3 레벨 중성점 다이오드 클램프(NPC) 컨버터는 각 스위치 소자에서 손실이 불균형하게 발생하게 되어 스위치 소자 간 성능이 불균형하게 된다. 따라서 본 논문에서는 단상 3 레벨 중성점 다이오드 클램프(NPC) 컨버터의 기존 모델 예측 제어의 스위칭 패턴을 분석 및 스위칭 순환방식을 이용한 효율적인 스위칭 상태를 갖는 모델 예측 제어를 제안한다. 이를 통해 PI 제어기 기반의 펄스 폭 변조 방법과 기존 모델 예측 제어 방법의 손실 비교를 통하여 제안하는 모델 예측 제어 성능을 검증한다.

### 1. 서 론

최근 산업계에서는 철도 차량을 위한 고속 견인 시스템이 요구되고 있다. 고속 견인 시스템은 변압기, 단상 정류기, 3상 인버터 그리고 견인 전동기로 구성되는데, 그 중 단상 정류기는 2 레벨 또는 3 레벨을 갖는 단상 정류기가 사용된다. 2 레벨 컨버터는 간단한 회로를 갖는 장점이 있지만, 스위치에 낮은 전압 스트레스, 낮은 전압 왜곡 그리고 낮은 EMI(Electromagnetic Interference) 특성 등 때문에 3 레벨 컨버터를 2 레벨 컨버터보다 고전력에 많이 사용된다.<sup>[1]</sup> 하지만 단상 3 레벨 중성점 다이오드 클램프(NPC) 컨버터는 스위칭 소자에 불균등한 손실을 발생시킨다. 이러한 불균등한 손실은 스위칭 소자에 스위칭 주파수와 출력 전력을 제한시킨다.

따라서 본 논문에서는 스위칭 소자의 균일한 손실을 발생하기 위한 모델 예측 제어를 제안한다. 기존 모델 예측 제어는 DC link capacitor 전압 균형을 위한 구성 때문에 스위칭 수를 증가시킨다. 하지만 정상상태에서는 전압 균형을 위한 제어는 전류 품질에는 영향 없이 상대적으로 스위칭 개수정상 상태에서 만 증가한다. 하지만 제안하는 모델 예측 제어는 전압 균형을 위한 구성은 제거함으로써 단상 3 레벨이 가지는 중복 스위칭 상태를 이용하여 스위칭 순환 방식을 이용하여 각 스위치의 개수 감소 및 유사한 스위칭 수를 발생시켜 각 스위칭 소자의 균일한 손실을 발생시킨다. 또한 일반적으로 3 레벨 중성점 다이오드 클램프(NPC) 컨버터를 제어하기 위해 사용되는 PI 제어기 기반의 멀티 캐리어를 이용한 펄스폭 변조 방식 및 기존 모델 예측 제어 방식과의 손실 비교를 통하여 제안한 모델 예측 제어의 각 소자의 균일한 손실을 나타낸다.

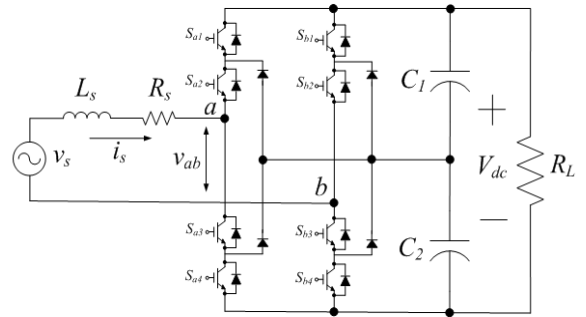


그림 1 단상 3-레벨 NPC 컨버터 구조  
 Fig. 1 Structure of single-phase 3-level NPC converter

### 2. 모델 예측 제어 기반 3-레벨 NPC 컨버터의 손실 균형

#### 2.1 3-레벨 NPC 컨버터를 위한 모델 예측 제어

기존 PI 제어기 기반의 펄스폭 변조 방식을 넘어 microprocessor의 발전에 따른 새로운 전류 제어 방식인 모델 예측 제어가 최근에 많이 사용된다. 모델 예측 제어는 비선형 시스템 및 빠른 동특성을 갖는 특징이 있다. 먼저, 그림 1에 나타난 인덕터 L에 걸리는 전압을 kirchhoff 전압 법칙을 이용하여 분석한다. 이를 일정 샘플링 주기를 이용하여 다음 스텝의  $i_s(k+1)$ 의 전류를 구할 수 있는데, 이 전류를 레퍼런스 전류와 비교하여 cost function을 구성한다. 추가적으로, 일반적인 cost function에 3 레벨 NPC 컨버터가 갖는 두 개의 DC link 커패시터 전압 불균형을 제어하기 위해 필요한 부분까지 고려하여 cost function을 구성한다.<sup>[2]</sup> cost function은 아래 수식과 같다.

$$g = |i^*(k+1) - i(k+1)| + \lambda_c |v_{c1} - v_{c2}| \quad (1)$$

$\lambda_c$ 는 weighting factor로서 전압 균형을 위한 구성의 가중치를 나타낸다. 하지만 전압의 불균형이 발생하지 않았을 때는 cost function의 전압 밸런싱 부분은 스위칭 수를 증가시킨다. 이는 스위칭 손실을 증가하게 하고, 스위치 소자들의 불균등한 손실을 발생시킨다.

#### 2.2 스위칭 순환 방식을 통한 스위칭 밸런싱

단상 3 레벨 NPC 컨버터는 그림 2에 나타난 것처럼 중복 스위칭 상태를 가진다. 모델 예측 제어 기반의 방법에서 중복 스위칭 상태는 다음 스텝 전류  $i_s(k+1)$  값이 같다. 하지만 스위치 상태의 따라서 각 스위치 소자의 손실은 달라진다. 영 전압

스위칭 상태는 스위칭 손실을 고려하여 Si 상태만 사용한다. 하지만  $V_{dc}/2, -V_{dc}/2$  전압은 상태에 따라서 다른 손실을 발생한다. 따라서 입력전압의 한 주기마다 중복 스위치를 번갈아 사용하면서 각 스위칭을 순환시킨다.<sup>[3]</sup> 정상상태에서는 식 (1)의  $\lambda_c$  값을 0로 하고, 스위칭 순환 방식으로 스위칭 수를 감소와 스위칭 수의 균형을 맞출 수 있다. 이는 각 소자의 균형된 손실 결과를 가져온다. 하지만  $\Delta V_c$  값이 일정 이상 되었을 때는  $\lambda_c$ 에 일정 값을 주어서 DC link 커패시터 전압이 균형되게 만든다.

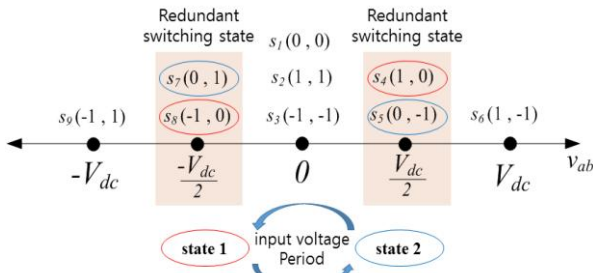


그림 2 스위칭 상태 및 스위칭 순환 방식 알고리즘  
Fig. 2 Switching state of 3-level converter and switching rotation algorithm

### 3. 시뮬레이션 결과

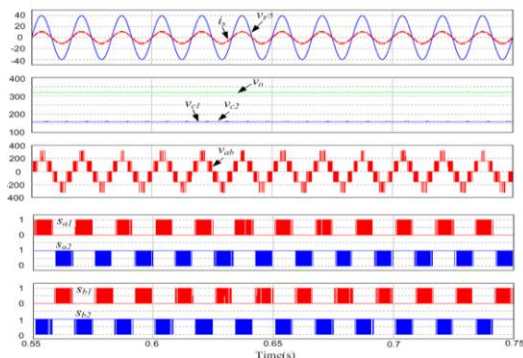


그림 3 기존 모델 예측 제어 기반 단상 3-레벨 컨버터 파형  
Fig. 3 waves of single phase 3-level NPC converter based on conventional MPC method

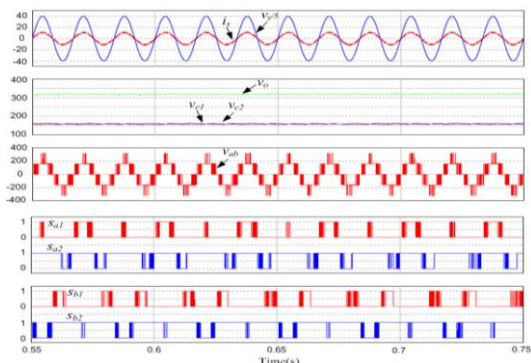


그림 4 제안된 모델 예측 제어 기반 단상 3-레벨 컨버터 파형  
Fig. 4 waves of single phase 3-level NPC converter based on proposed MPC method

시뮬레이션에서 사용된 소자는 다음과 같다.

$$\cdot R_s=1\Omega \cdot L_s=5.6mH \cdot R_l=100\Omega \cdot v_s=200V \cdot V_{dc}=320V$$

그림 3, 4는 기존 및 제안된 모델 예측 제어를 통한 단상 3레벨 컨버터의 입력 전압 및 전류파형과 출력 전압 및 DC link 커패시터 전압 파형을 나타내고 있고, line line 전압과 각 상의 upper 스위치  $S_{aj}(j=1,2), S_{bi}(i=1,2)$ 의 스위칭 신호 패턴을 보여준다. 제안된 방법은 기존 방법보다 적은 스위칭을 하지만 입력전류 THD는 같은 성능을 볼 수 있다. 또한, 중복 스위치 패턴이 한 주기 별로 순환하는 것을 볼 수 있다.

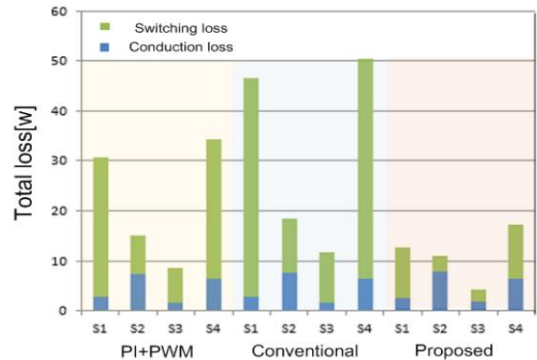


그림 5 각 스위치의 손실 분석  
Fig. 5 Analysis of total loss in upper switch of each phase

그림 5는 입력 전력 1kW에서 PI제어기 기반의 펄스 폭 변조 방법과 기존 및 제안된 모델 예측 제어 방법의 손실을 비교한 그래프이다. 제안된 방법은 중복스위치 상태를 이용한 스위칭 순환 방식으로 다른 방법보다 각 소자의 발전되어 균일한 손실을 확인할 수 있다.

### 4. 결 론

본 논문에서는 모델 예측제어 기반 3레벨 NPC 컨버터의 각 소자의 손실 균형에 대해 제안하였다. 중복 스위칭 상태를 순환시켜주는 방법을 통해서 입력 전류 THD에는 변화를 주지 않고 기존 모델 예측 제어와 비교하여 각 소자의 균일한 손실을 발생하는 것을 검증하였다.

### 참고 문헌

- [1] J. Shen and N. Butterworth, "Analysis and design of a three level PWM converter system for railway traction applications," IEE Proc. Electr. Appl., vol. 144, no. 5, pp. 355-371, Sep. 1997
- [2] D. Andler, M. Perez, J. Rodriguez, S. Bermet, "Predictive Control of Three Level Active NPC Converter with Evenly Energy Losses Distribution" International Power Electronics Conference, 2010 IEEE PP.754-759, 2010
- [3] I. G. Kim, S. S. Kwak, "모델 예측 제어 기반 Cascaded H bridge 컨버터의 균일한 손실, 스위칭 주파수, 전력 분배를 위한 알고리즘" 전력전자학회 논문지, vol. 20, no. 5, pp. 448-455, Oct. 2015