

스위칭 손실을 줄이기 위한 모듈형 멀티레벨 컨버터의 제어 방법

박소영, 김재창, 곽상신
 중앙대학교 전자전기공학부

Control method for Modular Multilevel Converter to reduce switching losses

So Young Park, Jae Chang Kim, SangShin Kwak
 School of Electrical & Electronics Engineering, Chung-Ang University

ABSTRACT

본 논문에서는 모듈형 멀티레벨 컨버터 (Modular Multilevel Converter; MMC)의 스위칭 손실을 줄이기 위한 모델 예측 제어 (Model Predictive Control; MPC) 방법을 제안한다. 제안된 방법은 지령 상 전압과 상 전류를 이용하여 매 샘플링 시점마다 전류가 크게 흐르는 구간 동안 서브모듈의 스위칭 동작을 클램핑 시키는 옵셋전압을 계산한다. 제안된 방법의 스위칭 손실 저감 효과는 기존의 방법과의 손실 데이터 비교를 통하여 검증되었다.

1. 서론

모듈형 멀티레벨 컨버터 (Modular Multilevel Converter; MMC)는 쉬운 확장성과 낮은 스위칭 주파수, 출력 전압과 출력 전류의 낮은 전고조파왜율 (Total Harmonic Distortion; THD), 낮은 정격 전압, 고장 발생 시 여분의 모듈 이용 가능성 등의 장점으로 인해 중/고 전압 분야에 적합한 컨버터 토폴로지로서 각광 받고 있다. 이러한 MMC는 PI 선형 제어기와 펄스 폭 변조 (Pulse Width Modulation; PWM)에 의해 제어 되어왔는데, 최근에는 모델 예측 제어 (Model Predictive Control; MPC)를 통한 MMC 제어 연구가 활발히 진행되었다.^[1] 본 논문에서는 MMC의 스위칭 손실을 줄이기 위한 MPC 기법을 제안한다. 제안된 기법은 매 샘플링 시점마다 전류가 큰 구간에서 극 전압을 $+V_{dc}/2$, $V_{dc}/2$ 로 클램핑 시켜 서브모듈의 스위칭 손실을 감소시킨다. 이러한 동작을 위한 지령 극 전압은 지령 상 전압에 지령 상 전압과 지령 출력 전류를 이용해 구한 옵셋전압을 인가하여 생성된다.

2. 스위칭 손실을 줄이기 위한 MMC 제어

2.1 MMC의 모델 예측 제어

그림 1은 N 개의 서브모듈을 갖는 3상 모듈형 멀티레벨 컨버터 (MMC)의 구성도를 나타낸다. 3상 MMC는 V_{dc} 전원, 3개 레그 (Leg), 부하 R_o , L_o 로 구성되며, 각 레그는 상단 암 (Upper arm)과 하단 암 (Lower arm)의 직렬연결로 구성된다. 또한, 각 레그의 암은 N 개의 서브모듈 (Sub module)과 인덕터 L , 저항 R 의 직렬연결로 이루어져 있다. 하프 브릿지 구조의 스위치와 하나의 커패시터 C 로 이루어진 각 서브모듈은 S_i 의 스위치 동작에 따라 출력으로 0 또는 v_{Cm} 의 전압을 갖고 서브모듈의 직렬연결로 구성된 상단 암과 하단 암은 v_{Cmu} , v_{Cml} 의 암 전압을 생성한다. 3상 MMC의 상단 암과 하단 암에 대한

전압 방정식을 세우면 다음과 같다.

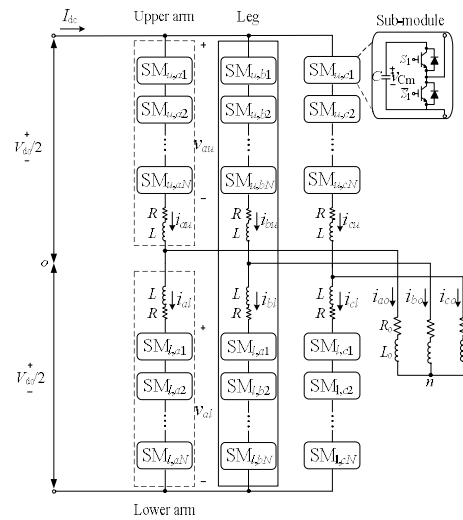


그림 1 MMC 시스템 구성도
 Fig. 1 Structure of MMC system

$$\frac{V_{dc}}{2} = v_{mu} + L \frac{di_{mu}}{dt} + L_o \frac{di_{mo}}{dt} + R_o i_{mo} \quad (1)$$

$$\frac{V_{dc}}{2} = v_{ml} + L \frac{di_{ml}}{dt} - L_o \frac{di_{mo}}{dt} - R_o i_{mo} \quad (2)$$

여기서 $m=a, b, c$ 3상을 나타낸다.

또한, 3상의 각 암에 흐르는 전류 i_{mu} , i_{ml} 와 레그에 흐르는 순환 전류 i_{mcir} 는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$i_{mu} = \frac{i_{mo}}{2} + i_{mcir}, \quad i_{ml} = \frac{-i_{mo}}{2} + i_{mcir} \quad (3)$$

$$i_{mcir} = \frac{i_{mu} + i_{ml}}{2} - \frac{I_{dc}}{3} \quad (4)$$

$$\frac{di_{mcir}}{dt} = \frac{V_{dc} - v_{mu} - v_{ml}}{2L_o} \quad (5)$$

출력 전류 i_{mo} 는 상단 암 전류와 하단 암 전류의 차이므로 식 (1)과 (2)를 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{di_{mo}}{dt} = \frac{v_{ml} - v_{mu} - (2R_o)i_{mo}}{2L_o + L} \quad (6)$$

각 상의 암 전압 v_{Cmu} , v_{Cml} 은 암에서 서브모듈의 S_i 이 온 상태 인 수를 나타내는 삽입 지수 (Insertion index) M_{mu} , M_{ml} 에 따라 그 값이 정해지고 다음 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{m1} = \frac{M_{m1} \sum v_{Cm1}}{N}, \quad v_{m2} = \frac{M_{m2} \sum v_{Cm2}}{N} \quad (7)$$

MMC는 출력 전류와 순환전류, 서브모듈 커패시터 전압의 제어를 필요로 한다. 또한 서브모듈의 커패시터 전압은 암 전류의 극성에 따라 충전 또는 방전하기 때문에 각 서브모듈 커패시터 전압들의 평형을 맞추주기 위한 전압 평형 알고리즘이 필요하다. MPC를 MMC에 적용하기 위해서는 먼저 아래 식 (8)과 같이 미리 정의된 비용 함수 (Cost function)를 이용한 최적의 삼입 지수를 찾아내는 과정과 이 삼입 지수를 이용하여 전압 평형 알고리즘을 수행하는 과정이 필요하다.

$$g_m = w_1 |i_{no}^*(k+1) - i_{no}(k+1)| + w_2 |i_{ner}^*(k+1) - i_{ner}(k+1)| + w_3 |V_{dc}^* - \sum v_{Cm1}(k+1)| + w_4 |V_{dc}^* - \sum v_{Cm2}(k+1)| \quad (8)$$

비용 함수를 구성하고 있는 미래 출력 전류와 순환 전류는 포워드 오일러 근사 (Forward Euler approximation)를 이용하여 식 (5)와 (6)을 이산 시간 모델 (Discrete time model)화 함으로써 예측될 수 있다. 비용 함수를 이용하여 각 암의 최적의 삼입 지수를 찾아내면 그림 2의 전압 평형 알고리즘에 적용하여 각 서브모듈 커패시터 전압들의 평형을 맞추주게 된다.

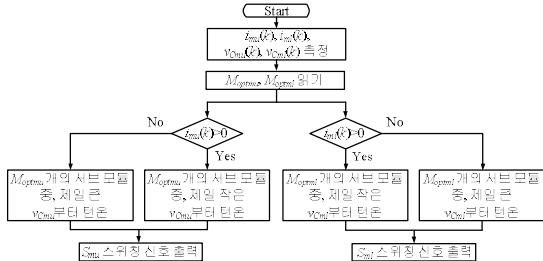


그림 2 전압 평형 알고리즘 순서도

Fig. 2 Flow chart of voltage balancing algorithm

2.2 제안하는 스위칭 손실 저감 제어 방법

그림 3은 제안하는 MMC의 스위칭 손실을 줄이기 위한 제어 블록도를 나타낸다. 지령 극 전압을 생성하기 위한 오셋전압 v_{offset} 은 전류 크기에 따라 다음과 같은 값을 갖는다.

$$\text{if } |I_{max}| > |I_{min}| \Rightarrow v_{offset} = V_{dc} / 2 - V_{max} \quad (9)$$

$$\text{if } |I_{max}| < |I_{min}| \Rightarrow v_{offset} = -V_{dc} / 2 - V_{min} \quad (10)$$

여기서 V_{max} , V_{min} 은 3상의 지령 상 전압 중 제일 큰 상 전압, 제일 작은 상 전압을 나타내고 I_{max} , I_{min} 은 해당 상의 전류를 나타낸다. 제안된 방법은 식 (9)와 (10)에 의해 계산된 오셋전압을 이용하여 지령 극 전압을 만들고, 식 (8)의 비용함수의 출력 전류 오차 항을 극 전압에 대한 오차 항으로 변경하여 사용한다. 표 1은 제안된 방법을 15 레벨 3상 MMC 시뮬레이션에 적용하기 위한 시스템 상수 값들을 나타낸다. 그림 4는 제안된 방법의 결과를 나타내고 지령 극 전압이 클램핑 되는 구간에서 스위칭 동작이 멈추는 것을 확인할 수 있다.

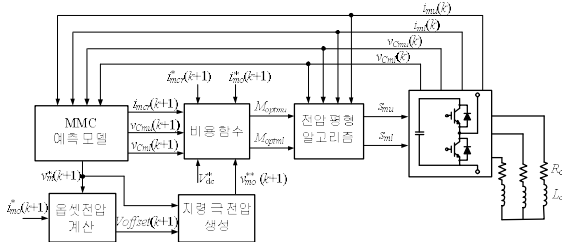


그림 3 제안하는 방법의 제어 블록도

Fig. 3 Control block diagram of the proposed method

표 1 15-레벨 MMC 파라미터

Table 1 Parameters of the 15-level MMC

V_{dc}	1000 [V]	R_o	15 Ω
T_{sp}	100 [μ s]	L_o	10 [mH]
N	7	I^*	20 [A]
L	4 [mH]	P	9 [kW]

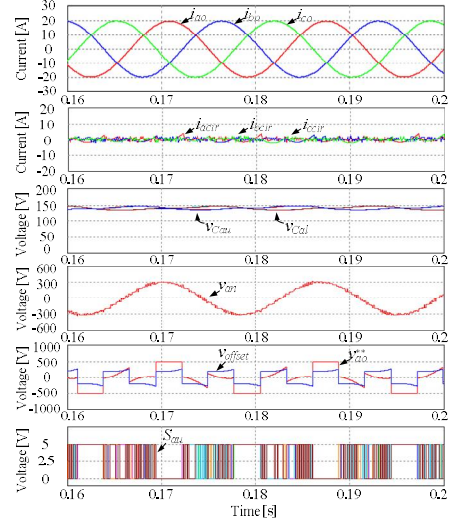


그림 4 시뮬레이션 결과

Fig. 4 Simulation results

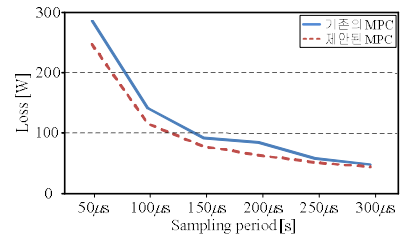


그림 5 스위칭 손실 데이터 비교

Fig. 5 Comparison of switching losses

그림 5는 제안된 방법과 기존 방법의 샘플링 주기 (T_{sp})에 따른 스위칭 손실을 나타낸다. 제안된 방법의 경우 모든 샘플링 주기에서 기존의 방법보다 낮은 스위칭 손실을 갖고, 200 μ s에서 기존 방법 대비 최대 24% 낮은 스위칭 손실을 보였다.

3. 결론

본 논문은 모듈형 멀티레벨 컨버터 (MMC)의 스위칭 손실을 줄이기 위한 MPC 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 적용하였을 경우 기존 대비 최대 24% 낮은 스위칭 손실 결과를 얻을 수 있었다.

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

참고 문헌

- [1] M. Vatani, B. Bahrani, M.Saeedifard, and M. Hovd, "Indirect finite control set model predictive control of modular multilevel converters," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 3, pp. 1520-1529, May 2015