

HVDC용 MMC의 인버터 초기 기동시 발생하는 직류단 돌입전류 억제 기법

정 웅, 박 창 환, 김 장 목
부산대학교 전기전자컴퓨터공학과

DC Inrush Current Suppression Method during the transient response of Inverter in MMC HVDC System.

Woong Jung, Chang Hwan Park, Jang Mok Kim
Pusan National University, Department of Electrical and Computer Engineering

ABSTRACT

본 논문은 모듈러 멀티레벨 컨버터(MMC)에서 인버터로 사용할 경우 스위칭이 시작할 때, 과도상태에서 발생하는 돌입전류로 인해 시스템 제어의 불안정성을 야기한다. 따라서 이 전류를 저감하기 위해 제안한 등가회로 모델링, 제어를 MATLAB 시뮬레이션을 통하여 돌입전류에 대한 논의와 크기 저감을 확인하고자 한다.

1. 서 론

전압형 HVDC 분야에서 각광받는 MMC 시스템의 운영에 대해 MMC 시스템을 인버터로 동작하여 스위칭 시작할 때, 각 서브모듈 전압이 초기 전압보다 2배로 상승되어 발생하는 급격한 DC단 돌입전류는 초기 시스템 제어 불안정성을 초래한다.

본 논문에서는 초기 기동 시, 각 상에 1/3씩 흐르는 돌입전류를 제어하는 영전압 성분을 토대로 등가회로와 알고리즘을 구성하여 시뮬레이션으로 검증하고자 한다. 여기서 논의된 MMC는 5레벨 하프 브리지 형태의 서브모듈을 바탕으로 구성하였고, 위상천이기법 기반으로 제어하였다.

2. 모듈러 멀티레벨 컨버터 시스템 구조 및 제어

2.1 기본구조

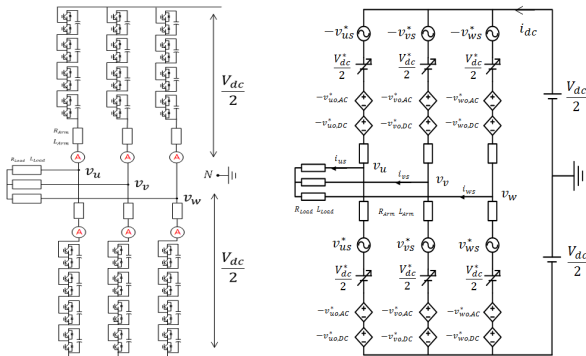


그림 1 모듈러 멀티레벨 컨버터 시스템 회로(좌) 및 등가회로 모델(우).

Fig. 1 Modular Multilevel Converter System Circuit (Left) and Equivalent Circuit Figure (Right).

모듈러 멀티레벨 컨버터의 구조는 그림 1과 같다. 각 암은

N개의 서브모듈과 암 인덕터로 구성된다. 그리고 N개의 서브모듈과 인덕터를 합쳐서 암이라 하고, 상/하단 암을 모두 합쳐서 레그라고 한다.

2.2 등가회로

그림1의 오른쪽 등가모델은 기존 등가회로^[1]에서 v_{x0}^* 성분을 DC단 순환전류 제어 성분인 $v_{x0,DC}^*$, 내부 순환전류 제어 성분인 $v_{x0,AC}^*$, 출력 제어 전압 성분인 v_{xs}^* 으로 나눠서 나타냈다. 이 3가지 제어 성분을 토대로 다음과 같이 3가지 등가회로로 MMC 시스템을 나타낼 수 있다. ($x = a, b, c$)

2.2.1 내부/DC단 순환전류 기준 등가회로

그림 1의 오른쪽 등가회로에서 각 상 레그를 통하여 KVL 적용한 식을 도출할 수 있다.

$$V_{dc} - V_{dc}^* = -2v_{x0}^* + 2(R_{arm} + sL_{arm})i_{x0} \quad (1)$$

$$v_{x0}^* = v_{x0,AC}^* + v_{x0,DC}^*, \quad i_{x0} = i_{x0,AC} + \frac{i_{dc}}{3} \quad (2)$$

3상에 대해서 전개한 (1)의 식을 모두 더하면 DC단 순환전류 관련 (3)의 식을 도출할 수 있다.

$$V_{dc} - V_{dc}^* + \frac{2}{3}(v_{uo,DC}^* + v_{vo,DC}^* + v_{wo,DC}^*) = \frac{2}{3}(R_{arm} + sL_{arm})i_{dc} \quad (3)$$

여기서 v_{com}^* 은 다음 (4)식과 같이 정의한다.

$$v_{com}^* = \frac{2}{3}(v_{uo,DC}^* + v_{vo,DC}^* + v_{wo,DC}^*) \quad (4)$$

내부 순환전류 관련 식을 도출하기 위해 (3)의 식에 (1)식을 대입하면 (5)식을 도출할 수 있다.

$$2(R_{arm} + sL_{arm})(i_{x0} - \frac{i_{dc}}{3}) = 2v_{x0,AC}^* + \frac{4}{3}v_{uo,DC}^* - \frac{2}{3}v_{vo,DC}^* - \frac{2}{3}v_{wo,DC}^* \quad (5)$$

(5)식의 좌변의 전류항은 (2)식에 의해 $i_{x_o,AC}$ 로 나타낼 수 있고, 우변의 $v_{x_o,DC}^*$ 항은 영전압 성분으로써, 커패시터 전압을 제어하게 된다. 3상 대칭회로인 경우, 이 전압 성분은 같다고 가정할 수 있으며, 우변의 $v_{x_o,AC}^*$ 항을 제외한 나머지 항의 합은 0이 된다. 따라서 내부 순환전류에 관련 (6)의 식과 같다.

$$2(R_{arm} + sL_{arm})i_{x_o,AC} = 2v_{x_o,AC}^* \quad (6)$$

도출된 (3)식과 (6)식을 통하여 순환전류 등가회로를 그림2와 같이 등가회로로 표현할 수 있다.

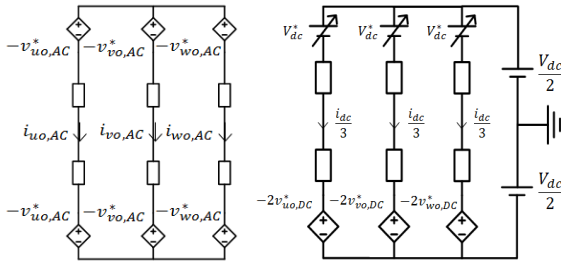


그림 2 내부 순환전류 등가회로 (좌) 및 DC단 등가회로 모습 (우).
Fig. 2 Inner Circulating Current Equivalent Circuit (Left) and DC Equivalent Circuit Figure (Right).

2.3 DC단 돌입전류 저감 알고리즘

다음 그림3과 같이 기존 내부 순환전류 알고리즘^[2]에 그림2의 회로를 근거하여 DC단 돌입전류 저감 알고리즘을 추가하였다.

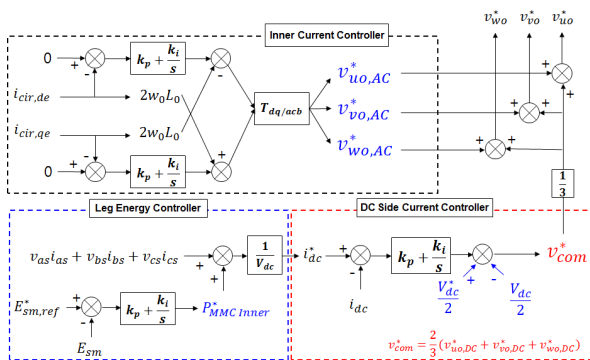


그림 3 전체 순환전류 제어 알고리즘 모습.
Fig. 3 Circulating Current Control Algorithm Figure.

그림3에서 레그 에너지 제어기는 서브모듈 에너지를 제어하고, 종속으로 연결된 DC단 돌입전류 제어기를 통해 영전압 성분인 v_{com}^* 을 만들어 초기 기동 시 발생하는 돌입전류를 제어하게 된다.

2.4. MATLAB 시뮬레이션

표1은 MATLAB 시뮬레이션 파라미터를 정리한 표이다. DC전압 200V 상태에서 인버터 스위칭을 하였고, 출력 전류는 800mA로써 제어하였다.

그림 3은 DC단 돌입전류 제어 전/후 비교 모습이고, 제어를 하면서 DC단 순환전류와 각 상의 암 전류가 지수함수 형태로 제어됨과 동시에 출력 전류의 상승곡선이 안정하게 올라가는

것을 확인할 수 있다. 크기를 비교할 때 DC단 돌입전류 제어하기 전에는 80A로 큰 전류가 짧은 시간 내에 흐르면서 시스템 안정성에 위험을 주는 반면, 제어를 한 후에는 DC단 돌입전류가 약 6A 수준까지 감소되는 것을 볼 수 있다. 또한 암 전류 영향을 받는 서브모듈 전압이 돌입전류 제어 후, 안정된 파형 곡선을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

표 1 MMC 시뮬레이션 파라미터 값
Table 1 MMC Simulation Parameter Values

C_{SM}	1.5 mF	DC Voltage	200 V
L_{arm}	5.6 mH	L_{Load}	5.6 mH
R_{arm}	63 mOhm	R_{Load}	100 Ohm

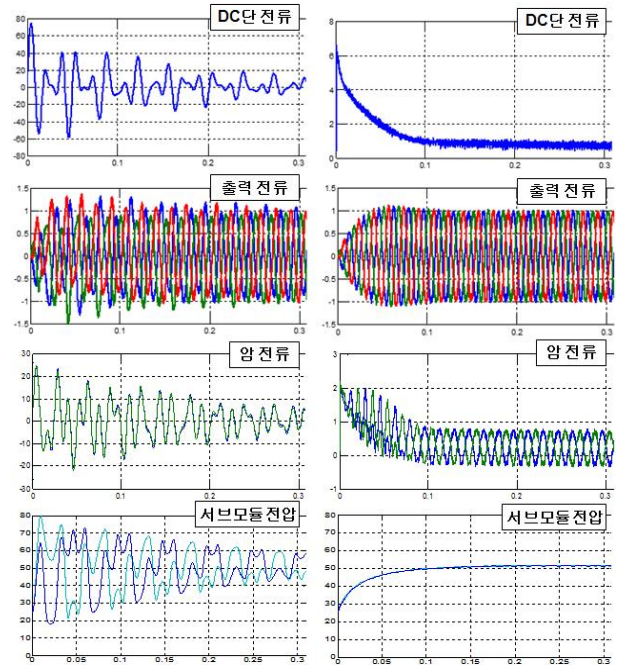


그림 4 DC단 돌입전류 제어 전 (좌), 제어 후 (우).
Fig. 4 DC Inrush Current Control Before (Left) and After (Right).

3. 결론

위의 2.2절에서 MMC 시스템의 순환전류를 내부/DC단 각각 제어하는 전압 성분으로 나뉘서 각각의 등가회로로 표현할 수 있음을 밝혔고, DC단 돌입전류 제어기를 구성하여 기동 초기에 내부 순환전류 및 DC단 돌입전류가 저감됨과 시스템이 안정되는 것을 시뮬레이션으로 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Shenghui Cui, Sungmin Kim, Jae Jung Jung and Seung Ki Sul, "A Comprehensive Cell Capacitor Energy Control Strategy of a Modular Multilevel Converter (MMC) without a Stiff DC Bus Voltage Source," IEEE trans 2014.
- [2] Qingrui Tu and Zheng Xu and Jing Zhang, "Circulating Current Suppressing Controller in Modular Multilevel Converter," IEEE Trans 2010.