

시뮬레이션 연산시간 단축을 위한 MMC HVDC 시스템의 가속모델 구현

이병혁 김시환 김태진 김래영†
한양대학교

Implementation of Accelerated Model for Modular Multilevel Converter Based HVDC System to reduce simulation operation time

Byung hyuk Lee, Si hwan Kim, Tae Jin Kim, Rae young Kim†
Hanyang University

ABSTRACT

고압직류송전 (High Voltage Direct Current, HVDC) 시스템의 모듈형 멀티레벨 컨버터 (Modular Multilevel Converter, MMC)는 EMT (Electromagnetic Transients) 시뮬레이션으로 구현 시 많은 연산시간을 요구하므로 시간 단축을 위한 가속설계가 반드시 필요하다. 본 논문에서는 스위칭 함수를 이용한 등가 모델을 이용하여 각 암을 하나의 전압원으로 단순화하였다. 본 가속모델의 유효성을 검증하기 위해 PSCAD/EMTDC에서 제공하는 반도체 스위치를 이용한 모델과 비교하여 시뮬레이션 수행시간을 비교하였다.

1. 서 론

전압형 고압직류송전 (High Voltage Direct Current, HVDC) 에 적용가능한 멀티레벨 컨버터 토폴로지들 중 계통 운용을 위한 신뢰도가 우수한 모듈형 멀티레벨 컨버터 (Modular Multilevel Converter, MMC) 연구가 활발히 진행되고 있다. MMC는 기계적 파손에 대비하여 예비 SM (Submodule) 이 투입되어 동작하는 예비 동작 (Redundant operation) 이 가능하고, 고장난 SM에 대해서만 수리 및 교체를 하면 된다.^[1] HVDC 시스템과 같은 대용량 전력전송 시스템에 MMC를 사용하는 경우 많은 수의 SM이 요구된다. 최초로 상용화 된 MMC HVDC 프로젝트는 미국의 Trans Bay Cable Project(TBC)로 각 암당 216개의 SM을 가지고 있다. 이러한 시스템을 구현 할 시 시간과 비용에 대한 제약이 따르므로 반드시 EMT (Electromagnetic Transients) type 시뮬레이션 검증이 선행되어야 한다. 그러나 각 암당 200여개의 SM을 가진 MMC에 대해 EMT type 시뮬레이션이 수행되는 경우 11시간 가량 소요되므로^[2] 현실적이지 못하다.

본 논문에서 제안하는 가속 모델은 MMC HVDC 시스템의 한 암에 속한 많은 SM들을 스위칭 함수를 기반으로 하여 하나의 전압원으로 표현하였다. 또한 SM의 개수가 증가함에 따라 주된 문제점으로 드러나는 도통 손실성분도 고려하여 가깝게 구현하였다.

제안한 가속 모델은 PSCAD/EMTDC에서 반도체 스위치를 이용한 모델과 비교함으로써 유효성을 입증하였다.

2. MMC 시스템 가속 모델

2.1 MMC 시스템 토폴로지

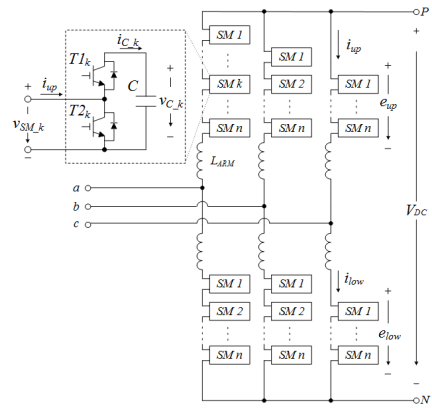


그림 1 MMC 시스템 구성도
Fig. 1 MMC system configuration

표 1 Submodule의 상태표
Table 1 Control states of submodule

$T1_k$	$T2_k$	$i_{up,low}$	v_{SM_k}	i_{C_k}
ON	OFF	> 0	v_{C_k}	> 0
ON	OFF	< 0	v_{C_k}	< 0
OFF	ON	> 0	0	0
OFF	ON	< 0	0	0

그림 1은 3상 MMC 시스템의 구성도이다. 계통측 기준으로 각 레그의 상단부와 하단부를 상단 암, 하단 암으로 구분한다. 각 암에는 n 개의 SM들과 한 개의 암 인덕터 L_{ARM} 이 직렬로 연결되어 있다. e_{up}, e_{low} 는 상단과 하단 암의 EMF (Electromotive force), i_{up}, i_{low} 는 상단과 하단 암의 전류이다. SM의 내부에는 두 개의 스위치와 하나의 커패시터로 구성되고, 스위칭 상태에 따라 표 1과 같이 동작한다.

2.2 MMC 시스템 가속 모델

순시적인 커패시터의 전압 v_C 는 식 (1)과 같이 초기 전압 V_{C0} 와 커패시터 전류 i_C 에 의해 결정된다.

$$v_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_C(t) dt + V_{C0} \quad (1)$$

스위칭 동작으로 인한 SM 단자전압 v_{SM} 과 커패시터 전류 i_C 는 식 (2), (3)와 같이 스위칭 함수 S_k 를 이용하여 표현할 수 있다. S_k 는 스위치 T_{1k} 가 ON, T_{2k} 가 Off일 때 1 이고, T_{1k} 가 Off, T_{2k} 가 ON일 때는 0 이다.

$$v_{SM_k} = S_k \cdot v_{C_k} \quad (2)$$

$$i_{C_k} = S_k \cdot i_{up,low} \quad (3)$$

식 (2)는 반도체 스위치의 도통 손실이 고려되지 않은 표현이다. SM의 개수가 많아질수록 도통 손실의 영향은 무시할 수 없다. 스위치의 도통손실분 저항 R_{ON} 을 고려한 각 SM 터미널 전압 v_{SM_k} 는 식 (4)와 같다.

$$v_{SM_k} = S_k \cdot v_{C_k} + R_{ON} \cdot i_{up,low} \quad (4)$$

각 압의 EMF e_{up} , e_{low} 는 해당 압에 속한 SM 단자전압들의 합과 같다. 그림 2와 같이 시뮬레이션 프로그램의 외부 제어 전압원으로 e_{up} , e_{low} 를 출력하는 EMF 등가모델을 구현할 수 있다.

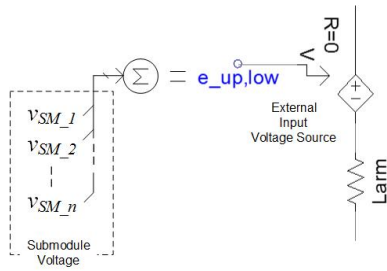


그림 2 MMC HVDC 시스템 가속모델
Fig. 2 Acceleration model of MMC HVDC Systems

3. PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 PSCAD/EMTDC 4.2.0 버전에서 32bit Microsoft Windows 7 운영체제가 설치된 인텔 i5 4430 @ 3.00GHz CPU, 4.00Gbyte 메모리를 가진 컴퓨터로 수행하였다. 시스템은 그림 3과 같이 구성하였다.

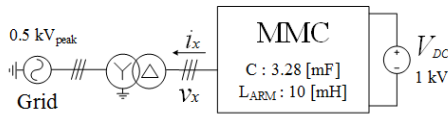


그림 3 MMC HVDC 시스템 단선 결선도.
Fig. 3 MMC HVDC system single diagram.

표 2 기본 모델과 가속 모델의 시뮬레이션 수행시간 비교
Table 2 Compared to runtime between basic and accelerated model

No. of SM	Running Time [s]		Acceleration Ratio [%]
	Basis Model	Accelerated Model	
10	41.5	10	415
20	327.9	11	2981
40	1445.1	14.4	10035.4
80	12109.4	26.8	45184.3

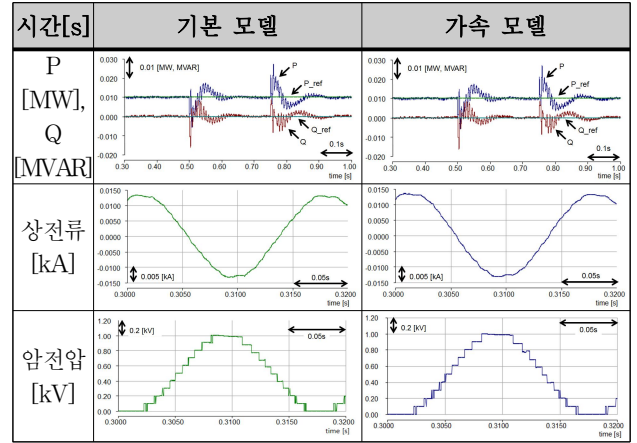


그림 4 기본 모델과 가속 모델의 시뮬레이션 결과 파형 (n=10)
Fig. 4 Simulation waveforms of basic and accelerated model (n=10)

표 2는 10 [μs] 의 solution time step으로 1초 동안 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 기본 모델의 시뮬레이션 수행시간은 SM의 개수에 따라 급격히 증가하는 반면, 가속 모델은 SM이 80개인 경우에도 30초 이내로 완료하였다.

그림 4는 0.3초부터 1초까지 유효전력, 무효전력의 파형과 0.3초부터 0.32초까지의 a상전류, 상단부 압전압 파형이다. 유효전력의 지령치는 10 [kW], 무효전력 지령치는 0 [kVAR] 로 설정하였으며, 변압기 Y측에서 A상 지락을 0.5초부터 0.75초동안 발생시켰다. 유효전력, 무효전력, 상전류, 그리고 압전압의 파형은 기본 모델과 가속 모델이 비슷하게 나타나고 있다. 이를 통해 가속 모델이 기본 모델과 비교하여 유사한 응답특성을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 스위칭 함수를 이용한 가속 모델을 제안하였고 그 유효성을 입증하였다. 본 모델은 MMC HVDC 시스템을 6개의 전압원과 12개의 수동소자 만으로 이루어진 간단한 회로로 구성된다. 전기회로가 시뮬레이션 수행시간에 미치는 영향을 줄이기 위해 SM을 C언어로 구성하여 시뮬레이션 수행 시간을 단축하였다.

PSCAD/EMTDC 프로그램에서 가속 모델의 유효성을 입증하였다. 스위칭 소자를 이용한 모델과 비교하여 짧은 시간 안에 유사한 결과값을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] A. Lesnicar, and R. Marquardt, "An Innovative Modular Multilevel Converter Topology Suitable for a Wide Power Range", in Proc. IEEE Bologna Power Tech Conf., Jun. 2003, vol. 3, 6 pp.
[2] J. Xu, C. Zhao, W. Liu, and C. Guo, "Accelerated model of modular multilevel converters in PSCAD/EMTDC," IEEE Trans. Power Del., vol. 28, no. 1, pp. 129-136, Jan. 2013