예비 서브모듈을 활용한 모듈형 멀티레벨 컨버터의 스위칭 주파수 저감 기법

유승환* · 정종규* · 한병문+
명지대학교 전기공학과

Switching Frequency Reduction Method for Modular Multi-level Converter utilizing Redundancy Sub-module

Seung Hwan yoo · Jong Kyou Jeong · Byung Moon Han
Department of Electrical Engineering, Myongji University

ABSTRACT

This paper introduces a scaled hardware model for the 10kVA, 1kV, 11 level MMC (Modular Multilevel Converter), which was manufactured in the lab based on computer simulations with PSCAD/EMTDC. Various experiments were conducted to verify the major operation algorithms of MMC.

The hardware scaled model developed in the lab can be utilized for analyzing the operation analysis and performance evaluation of MMC according to the modulation pattern and redundancy operation scheme.

1. 서 론

기존 NLC (Nearest Level Control) 모듈레이션을 사용할 경우 어떤 SM에 고장이 발생하면 커패시터의 평균전압이 증가하고 이 값이 맥동전압의 허용치를 넘으면 운전이 불가능하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 스위칭 주파수 조정 NLC 기법[1]을 적용할 수 있다. 그러나 이 기법을 사용할 경우 스위칭 주파수가 다소 높다는 단점이 있다.

이에 스위칭 주파수를 낮추기 위해 연속 스위칭을 회피하는 NLC 기법[2]을 사용할 수 있는데 이 경우 특정 SM의 커패시터 전압이 허용치를 초과하는 문제가 발생한다. 본 논문에서는 모든 SM 커패시터 전압이 정격 허용치 이내에 위치하도록 연속 스위칭 회피 NLC 기법에 최대 맥동전압 제한 NLC 기법을 합성한 새로운 스위칭 주파수 저감 NLC 모듈레이션을 제안한다.

2. Computer Simulation

2.1 MMC 전력회로

그림 1에 보인 것처럼 MMC의 한 상은 상·하단 두 개의 Arm으로 구성되며, 각 Arm은 리액터와 직렬로 연결된 SM으로 구성된다. 각 SM은 두 개의 IGBT 스위치와 하나의 커패시터로 구성된 반 브리지로 회로이다.

반 브리지 구조의 SM로 구성된 MMC의 경우, 한 암의 서브모듈이 n 개인 경우 최대로 출력할 수 있는 전압은 n·Vcap 이며, 최소 전압은 영이 된다.

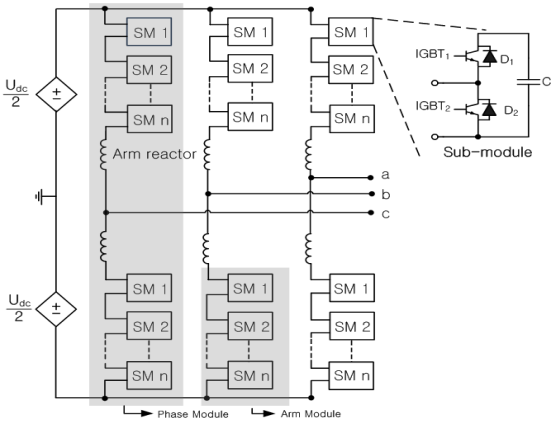


그림 1 예비 SM 2개를 갖는 11-level MMC
Fig. 1 11-level MMC with 2 redundancy SMs

표 1. MMC 시뮬레이션 모델 정수
Table 1. MMC simulation model parameters

Item	value
grid voltage	$22.9[kV], 60[Hz]$
DC link voltage	$\pm 20[kV]$
rated power	$40[MW]$
rated current	$1008[A]$
transformer(leakage inductance)	$Y(22.9[kV])-\triangle(22.0[kV])$ (10%)
number of SM	22개 ($n=20, R=2$)
SM capacitor average voltage	$2.0[kV]$
SM capacitor	$5587[uF]$ ($\epsilon=\pm 10\%$)
arm reactor	$5.2[mH]$

2.2 최대 맥동전압 제한 NLC

본 논문에서는 연속 스위칭 회피 NLC 모듈레이션에서 발생하는 커패시터 평균전압이 제한 값을 초과는 문제를 해결하기 위해 평균 스위칭 주파수는 최저로 한 상태에서 제한 값을 초과하는 SM을 바이패스 시켜 모든 커패시터 전압이 제한 값을 넘지 않도록 하는 최대 맥동전압 제한 기법을 제안한다. 이때 최대 맥동전압의 제한 값은 $n+1$ 레벨로 동작할 때 나타나는 최대 맥동전압을 사용하는 것으로 정하였다.

그림 2은 연속 스위칭 회피 NLC 모듈레이션에 최대 맥동전압 제한 기법이 추가된 출력전압 형성을 위한 순서도이다.

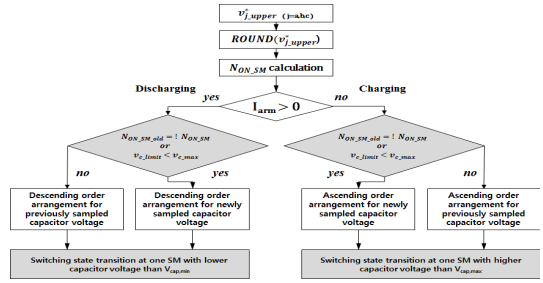
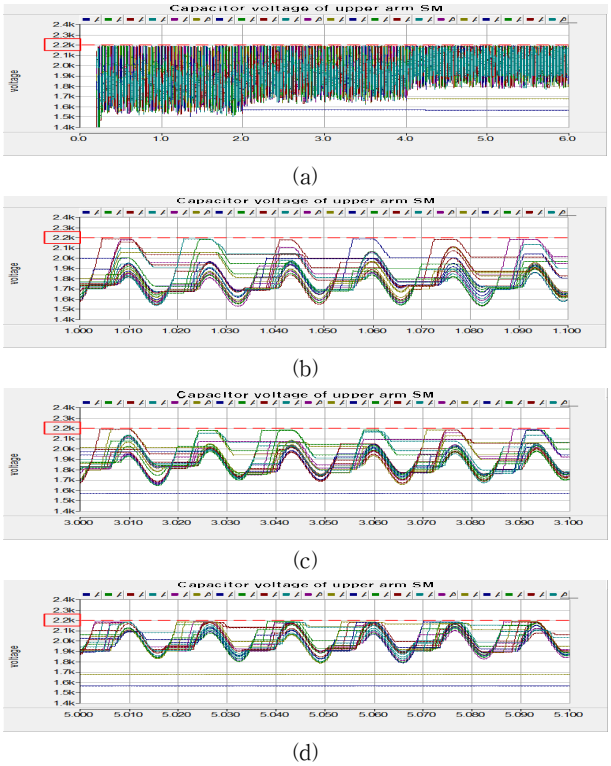


Fig. 2 제안하는 NLC 모듈레이션에 의한 SM 커패시터 전압 균등제어와 출력전압 형성을 위한 순서도

Fig. 2 Flow chart for SM capacitor voltage balancing and output voltage forming of proposed NLC modulation

그림 3는 제안하는 NLC 기법을 적용한 경우 SM 커패시터의 전압을 나타낸 것이다. SM에 고장이 발생함에 따라 커패시터의 평균전압은 상승하지만 제한 값 설정에 의해 모든 SM 커패시터의 전압이 설정된 제한 값 이내에서 동작함을 알 수 있다. 또한 SM 커패시터의 맥동전압이 고장이 발생함에 따라 저감되는 것을 확인할 수 있다.



(a) (b) (c) (d)

Fig. 3 제안하는 NLC 모듈레이션 기법에 의한 SM 고장 발생 시 상단 Arm SM의 커패시터 전압, (a) 전 구간 동작, (b) 23 레벨 동작, (c) 22 레벨 동작, (d) 21 레벨 동작

Fig. 3 Capacitor voltage of upper arm SM by proposed NLC modulation with faulted SM, (a) whole period operation, (b) 23-level operation, (c) 22-level operation, (d) 21-level operation

4. Hardware Result

3.1 최대 맥동전압 제한 NLC

그림 4는 제안하는 NLC 모듈레이션 기법을 적용한 MMC의 고장 SM 발생 시 커패시터 전압을 나타낸 것이다.

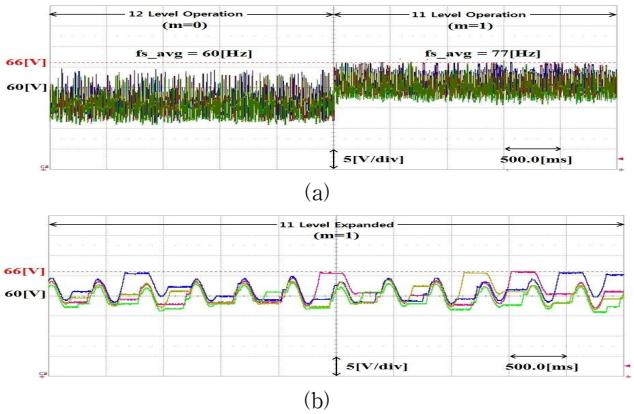


Fig. 4 제안하는 NLC 모듈레이션에 의한 고장 모듈 발생 시 상단 Arm 서브모듈 커패시터 전압, (a) 각 동작 전압 별 평균 스위칭 주파수, (b) 11 레벨 동작구간 확대 파형

Fig. 4 Capacitor voltage of upper arm SM by proposed NLC modulation with one SM faulted, (a) average switching frequency for each operation voltage, (b) expanded waveform of 11-level operation period

그림 4(a)는 고장 SM 발생 전·후 동작특성을 확인하기 위한 것이며, 고장 SM이 발생하지 않은 12 레벨 운전 구간에서는 SM 커패시터의 평균전압이 54.5[V]로 운전되고, 모든 SM 커패시터의 전압이 제한 값인 66[V] 이내에서 동작하므로 연속 스위칭 회피 기법만으로 운전이 가능하며, 이때 평균 스위칭 주파수는 60[Hz]로 동작한다. 그러나 고장 SM이 한 개 발생하면 출력전압은 11 레벨로 동작하게 되며, SM 커패시터의 평균전압은 54.5[V]에서 60[V]로 상승하게 된다. 이때 SM 커패시터 전압 중 제한 값을 넘어가는 경우가 발생하게 되면 설정된 제한 값에 의해 추가적인 스위칭이 일어난다. 이러한 과정을 통해 모든 SM 커패시터의 전압이 제한 값 이내에서 동작하게 된다. 11 레벨 동작 구간에서 평균 스위칭 주파수는 60[Hz]에서 77[Hz]로 증가하게 된다. 그림 4(b)는 11 레벨 구간을 확대한 파형으로 모든 SM 커패시터의 전압이 제한 값 이내에서 동작함을 확인 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 MMC의 예비 SM을 출력전압 형성에 활용하여 정상동작에서 출력전압의 고조파와 스위칭 주파수를 저감하고, 고장발생 시에도 각 SM 커패시터에 나타나는 전압을 제한하여 스위칭 주파수를 저감하는 모듈레이션 기법을 제안하였다. 비용에 따른 제약으로 하드웨어의 SM의 개수는 시뮬레이션의 절반에 해당하나 결과는 잘 일치함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

[1] Q. Tu and Z. Xu, "Impact of Sampling Frequency on Harmonic Distortion for Modular Multilevel Converter", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.26, No.1, January 2011.

[2] Q. Tu, Z. Xu and L. Xu "Reduced switching frequency modulation and circulating current suppression for modular multilevel converters", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 26, No 3, pp.2009 2017 2011.