

MMC의 순환 전류 제어기의 성능 비교 분석

조윤재, 이동춘
영남대학교

Performance Evaluation of Circulating Current Controllers in Modular Multilevel Converters

Yun Jae Jo and Dong Choon Lee
Yeungnam University

ABSTRACT

본 논문은 모듈러 멀티 레벨 컨버터 시스템에서 직류단과 레그 사이에 흐르는 순환 전류의 고조파 성분을 억제하기 위한 전류제어기들의 성능을 분석한다. 비례 적분 제어기, 공진 제어기, 반복 제어기의 성능을 PSIM 시뮬레이션을 통해 비교 분석한다.

1. 서론

최근 고압, 대용량 컨버터 분야에서 모듈러 멀티레벨 컨버터 (Modular Multilevel Converter, MMC)가 많은 관심을 받으며 이에 활발한 연구가 진행되고 있다. MMC는 많은 수의 서브 모듈이 직렬로 연결되기 때문에 전압 레벨 확장과 유지보수의 용이성, 낮은 스위칭 주파수에서도 우수한 출력을 얻을 수 있다는 장점으로 고압 직류(HVDC) 송전 및 무효 전력 보상기 (STATCOM), 모터 드라이브 분야 등에 적용되고 있다.

MMC 시스템에서 직류단과 레그 사이에 흐르는 순환 전류를 제어하기 위한 순환 전류 제어기가 요구된다. 순환 전류는 커패시터 에너지를 충전하기 위한 직류 성분과 기본파 성분의 짝수배의 고조파 성분을 포함한다. 이 고조파 성분은 추가적인 커패시터 전압 리플을 야기하고 암 전류의 크기 증가시켜 손실을 야기하므로, 이 고조파 성분을 억제하기 위한 순환 전류 제어기가 요구된다.

MMC에서 순환 전류를 억제하기 위한 제어 기법들은 비례 적분(PI) 제어기^[1], 공진(R) 제어기^[2], 반복 제어기^[2]를 적용한 기법들이 연구된 바 있다. 본 연구에서는 상기에 언급된 제어 방법들을 구현하고, 시뮬레이션을 통해 제어기의 성능을 비교 분석한다.

2. MMC 시스템

2.1 MMC 구성

하프 브리지 모듈을 이용한 MMC의 구조가 그림 1에 보인다. 각 암에 연결된 서브모듈 개수가 N일 때, 출력되는 극전압의 전압 레벨은 (N+1)이다. 각 암에는 단락 사고시 단락 전류의 급격한 상승을 방지하기 위한 암 리액터 L이 연결된다. 교류 출력단을 기준으로 2개의 암이 연결되어 하나의 레그를 구성한다. 직류단과 각 레그 사이에 흐르는 순환 전류를 i_{x0} 로 나타낸다. 상단 암에 흐르는 전류와 하단 암에 흐르는 전류를

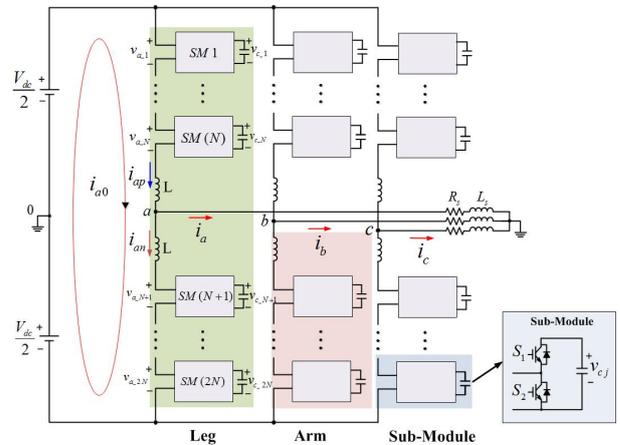


그림 1. (N+1)레벨 모듈러 멀티레벨 컨버터

각각 i_{xp} , i_{xn} 로 나타내며, 부하단에 흐르는 상전류를 i_a , i_b , i_c 로 나타낸다. 또한, R_s , L_s 는 교류 측의 저항, 인덕턴스를 나타낸다.

2.2 MMC 제어

본 논문에서 적용된 제어 토폴로지는 레그의 모듈 커패시터 전압을 평균값으로 제어하는 레그 평균 전압 제어 토폴로지^[1]를 채택한다. 평균 전압 제어기의 출력은 순환 전류 지령치이며, 순환 전류의 직류 성분을 제어하기 위해 비례 적분(PI) 제어기가 적용된다. 또한, 위상 천이 PWM 방법을 통해 게이팅 신호가 생성된다.

2.2.1 순환 전류 제어 기법

순환 전류에 포함된 고조파 성분의 억제를 위해 특정 주파수에서 무한대의 이득을 가지는 공진 제어기가 PI 제어기에 병렬로 연결된다. (PI R 제어기로 표기) 식(1)은 120[Hz], 240[Hz]로 설계된 공진 제어기의 전달 함수를 나타낸다.

$$G_{PR}(s) = \frac{K_{r120}s}{s^2 + (2\omega)^2} + \frac{K_{r240}s}{s^2 + (4\omega)^2} \quad (1)$$

여기서, K_{r120} , K_{r240} 는 공진 제어기의 이득, ω 는 기본파 주파수이다.

그림 2는 순환 전류 PI PR 제어기의 제어 블록 다이어그램을 보인다. 대역통과필터(Band Pass Filter, BPF)를 통해 순환

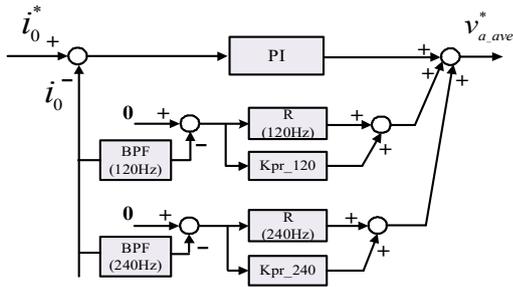


그림 2. 순환 전류 PI-PR 제어 블록 다이어그램

전류의 짝수배의 고조파 성분을 분리하고, 각 공진 제어기에 비례 제어를 추가함으로써 기존의 PI R 제어기보다 대역폭을 크게 하고 정상상태 오차를 더 감소시키며, 과도상태를 향상시킨다. 본 논문에서는 120[Hz], 240[Hz]의 고조파 성분을 억제하도록 설계되었다. 그러나 고조파의 개수만큼 제어기가 추가되어야 하기 때문에 제어기 구성이 복잡해져 연산량과 시간이 증가하는 단점을 지닌다.

상기의 공진 제어기의 단점을 보완하기 위해 반복 제어기를 주제어기에 병렬로 연결하여 고조파 성분을 억제시킬 수 있다. 반복 제어기의 구조는 주기 신호 발생기를 기반으로 하며, 주기적인 오차 신호를 모델링하여 미리 다음 주기를 발생시켜 보상을 주는 원리를 가진다. 이산 영역으로 표현된 반복 제어기의 전달 함수^[2]는 식(2)과 같다.

$$G_{RC}(z) = \frac{K_{rc}z^{-N+L}}{1-Q(z)z^{-N}} \quad (2)$$

여기서, K_{rc} 는 반복 제어기의 이득이고, N 은 한 주기 동안의 샘플링 수를 나타내며 84로 선정한다. L 은 디지털 제어기의 시지연 요소를 보상하기 위한 상수이며 3으로 선정한다. $Q(z)$ 는 제어기 안정화를 위한 저역 통과 필터이다.

3. 시뮬레이션

순환 전류 제어기의 성능을 비교하기 위해 PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 1[MW]급의 7 레벨 MMC 시스템을 채택한다. 직류단 전압은 4.8[kV]이며, 반송파 주파수는 2[kHz]이다. 각 모듈 커패시턴스는 1,900[μF], 암 인덕턴스는 3[mH]이며, 부하단의 저항과 인덕턴스의 값은 각각 23[Ω]과 6[mH]이다. PI 제어기의 비례 이득값은 7, 적분 이득값은 300으로 주었으며, R 제어기의 이득은 각각 300, 250으로 주었다. 그림 3은 순환 전류 제어기의 과도응답을 보인다. 그림 3은 0.45초에서 1/2 전부하에서 전부하로 변동 시, 순환 전류 제어기의 과도응답을 보인다. 4가지 제어기 중에서 PI PR 제어기의 과도 응답이 가장 빠름을 보인다. 그림 4, 5는 각 순환 전류 제어기의 성능과 순환 전류 피크치에 대한 FFT 결과를 보인다. 주제어기에 반복 제어기의 적용 시에 짝수배의 고조파 억제 능력이 가장 우수하다. 또한 PI PR 제어기의 주 고조파 성분(120Hz) 억제 능력이 PI R 제어기보다 우수함을 보인다.

4. 결론

본 논문은 MMC의 순환 전류에 포함된 고조파를 억제시키기 위한 순환 전류 제어기의 성능을 비교 분석하였다. 반복 제어기의 적용 시 고조파 억제 능력이 가장 우수하며, 특히 주 고조파 성분(120[Hz])이 약 86%로 크게 감소함을 보였으며, PI PR 제어기의 과도 상태 응답이 가장 우수함을 시뮬레이션을 통해 검증하였다

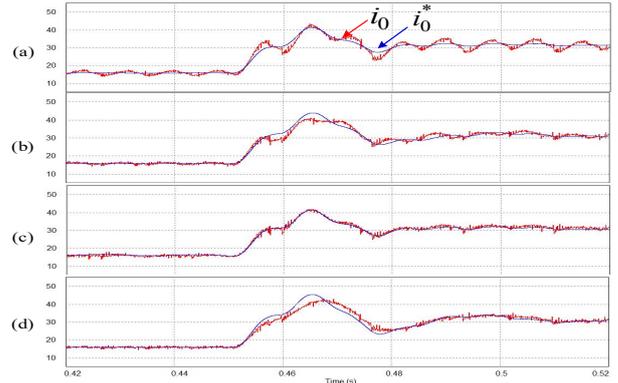


그림 3. 순환 전류 제어기의 과도 응답

- (a) PI 제어, (b) PI+R 제어, (c) PI+PR 제어, (d) PI+반복 제어

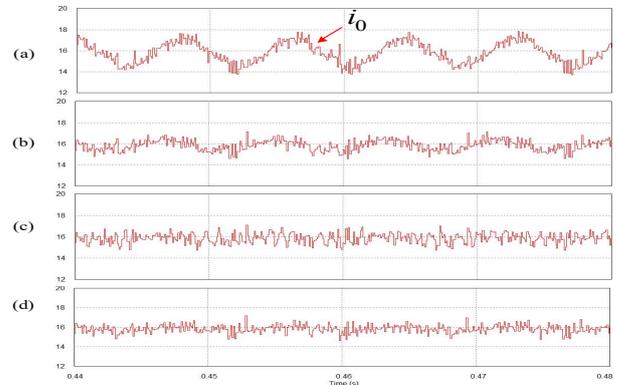


그림 4. 정상상태 특성

- (a) PI 제어, (b) PI+R 제어, (c) PI+PR 제어, (d) PI+반복 제어

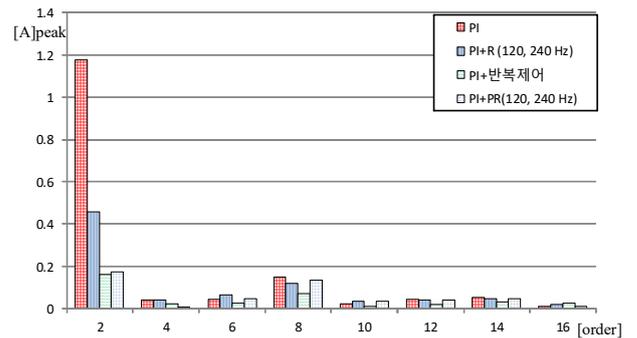


그림 5. 순환 전류 FFT 결과

참고 문헌

- [1] M. Hagiwara, R. Maeda, and H. Akagi, "Control and analysis of the modular multilevel cascade converter based on double star chopper cells(MMCC DSCC)", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 4, pp. 1649-1658, Jun. 2009.
- [2] M. Zhang, L. Huang, W. Yao, and Z. Lu, "Circulating harmonic current elimination of a CPS PWM based modular multilevel converter with a plug in repetitive controller", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 4, pp. 2083-2097, Apr. 2014.