

불평형 전압 조건에서 Vector PI 제어를 적용한 MMC-HVDC 시스템의 순환전류 제어

이준선, 김시환, 김래영*
한양대학교

Circulating Current Control of MMC-HVDC System based on Vector PI Controllers under Unbalanced Grid Voltage Conditions

June Sun Lee, Si Hwan Kim, Rae Young Kim*
Hanyang University

ABSTRACT

본 논문에서는 모듈형 멀티레벨 컨버터 (Modular Multilevel Converter ; MMC) 고압 직류 송전 (High Voltage Direct Current ; HVDC) 시스템의 순환전류 성분을 제어하기 위해 VPI (Vector Proportional Integral) 제어를 적용한 순환전류 제어 기법을 제안하였다. 제안한 방식은 기존의 준공진 (Quasi Resonant) 제어를 적용한 방식과 비교하여 계통 주파수 변동에 강인하고 넓은 공진 대역폭 선정이 용이한 장점을 갖는다. 제안한 순환전류 제어기의 성능은 기존의 준공진 제어기를 적용한 기법과 계통 전압 단상지락 및 계통 주파수 변동 상황에서 시뮬레이션을 통하여 비교 검증하였다.

1. 서 론

대전력 분야에서 MMC HVDC 시스템은 유효 및 무효전력의 독립적인 제어가 가능하고 전압 확장의 용이성과 같은 장점으로 인해 관심이 증대되고 있다. 이러한 장점을 가진 MMC 시스템은 각 상의 압전압 차이로 인해 내부에 순환전류가 발생하는 구조를 가진다. MMC 내부에 흐르는 순환전류는 압전류를 왜곡시키며, 적절히 제어하지 않을 경우 시스템의 불안정을 초래하기 때문에 이를 제어하기 위한 기법들이 연구되고 있다. 계통 전압이 평형인 상황에서 순환전류에는 2고조파의 역상분 성분만 존재하지만 불평형 전압 상황에서는 정상분 및 영상분 성분도 나타나게 된다. 이러한 성분들을 억제하고 주파수 변동에 강인하게 설계하기 위해 준공진 제어를 적용한 순환전류 제어 기법이 소개되었다.^[1] 하지만 준공진 제어를 적용한 방식은 개루프 전달함수에서 공진 대역폭을 크게 설정할수록 위상여유가 감소되는 특성을 보이고 폐루프 전달함수에서는 제어하고자 하는 2고조파 대역에서의 입력 대비 출력 값은 같지만 고주파수 대역에서는 이득 값이 상승함을 보여 주파수가 변동하는 상황에서 출력 값이 더 크게 발생하게 되어 안정성에 영향을 미칠 수 있다. 반면 VPI 제어를 적용하면 공진 대역폭의 변화에 따른 위상여유의 변화가 거의 없고, 폐루프에서 제어 주파수 부근의 원치 않는 이득으로 인해 출력 값이 증가하는 경우가 발생하지 않는다.^[2]

본 논문에서는 VPI 제어를 적용한 순환전류 제어 기법을 제안하고 기존의 준공진 제어를 적용한 순환전류 제어 기법과 시뮬레이션을 통해 계통 불평형 상황 및 계통 주파수 변동 상황에서 성능을 비교 검증한다.

2. 본 론

2.1 MMC-HVDC 시스템의 순환전류 특성

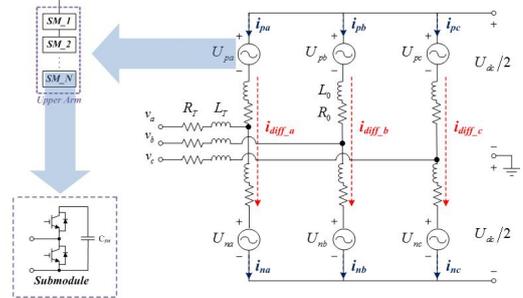


그림 1 모듈형 멀티레벨 컨버터

그림 1은 MMC HVDC 시스템 모델이다. 시스템의 내부 불평형 전압 특성은 식 (1)과 같이 표현되고, 불평형 전류는 식 (2)와 같이 표현되며 k 는 a, b, c 상을 의미한다.^[1]

$$U_{diff_k} = L_o \frac{di_{diff_k}}{dt} + R_o i_{diff_k} = \frac{U_{dc}}{2} - \frac{U_{pk} + U_{nk}}{2} \quad (1)$$

$$i_{diff_k} = \frac{i_{pk} + i_{nk}}{2} = I_{dck} + i_{zk}^+ + i_{zk}^- + i_{zk}^0 \quad (2)$$

식 (2)에서 I_{dck} 는 불평형 전류의 dc성분, i_{zk} 는 내부 순환전류 성분이며 계통주파수의 2배 크기를 갖는 2고조파의 형태를 갖는다. 평형 전압 조건에서 순환전류는 역상분 성분 i_{zk}^- 만 존재하지만 불평형 상황에서는 정상분 i_{zk}^+ , 역상분 i_{zk}^- , 영상분 i_{zk}^0 성분이 나타난다.

2.2 제안하는 순환전류 제어 기법

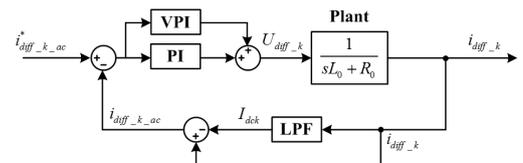


그림 2 제안하는 순환전류 제어 블록도

그림 2는 제안하는 순환전류 제어 블록도이다. 시스템에서 발생된 내부 불평형 전류 i_{diff_k} 를 추출하고 1차 저역통과필터 (Low Pass Filter ; LPF)를 통해 불평형 전류의 dc성분 I_{dck} 를

은 후 $i_{diff,k}$ 와의 차를 통해 순환전류 성분 $i_{diff,k,ac}$ ($=i_{zk}^+ + i_{zk}^- + i_{zk}^0$) 을 얻는다. 그 후 순환전류 성분을 억제하기 위한 지령값 $i_{diff,k,ac}^*$ 와의 차를 통해 얻어진 성분은 PI VPI 제어기를 통하여 억제된 후 시스템에 인가된다. 순환전류 제어에 적용되는 PI VPI 제어기는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$C_{PIVPI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{(K_{pr}s^2 + K_{ir}s)\omega_c}{s^2 + \omega_c s + (2\omega_g)^2} \quad (3)$$

$$K_{ir} = \frac{R_o}{L_o} K_{pr} \quad (4)$$

식 (3) 에서 K_p 와 K_i 는 PI 제어기의 비례이득과 적분이득 값이고 ω_g 는 계통의 각주파수이며, 공진 대역폭 ω_c 는 제어기의 강인성을 높이기 위해 공진 주파수에서의 대역폭을 결정한다. K_{pr} 와 K_{ir} 은 VPI 제어기의 비례이득과 적분이득 값이며, 식 (4)와 같이 시스템의 극점을 제어기의 영점으로 상쇄시켜 제어기의 이득 값 선정을 용이하게 한다.

3. 시뮬레이션

표 1 시스템 파라미터 및 제어기 파라미터

| Parameter | Value | Parameter | Value |
|--------------|-------|----------------|-------|
| Active Power | 10MW | Reactive Power | 0MVAR |
| AC voltage | 9kV | SM number | 10 |
| DC voltage | 20kV | | |

시스템 파라미터 값은 표 1과 같고 그림 2와 같은 제어블록도로 구성하여 시뮬레이션을 진행 하였으며 0.5초부터 0.8초 동안 계통 전압 단상지락을 발생시켰다. 제안한 방식의 성능을 검증하기 위해 준공진 제어기를 적용한 방식과 비교하였다.

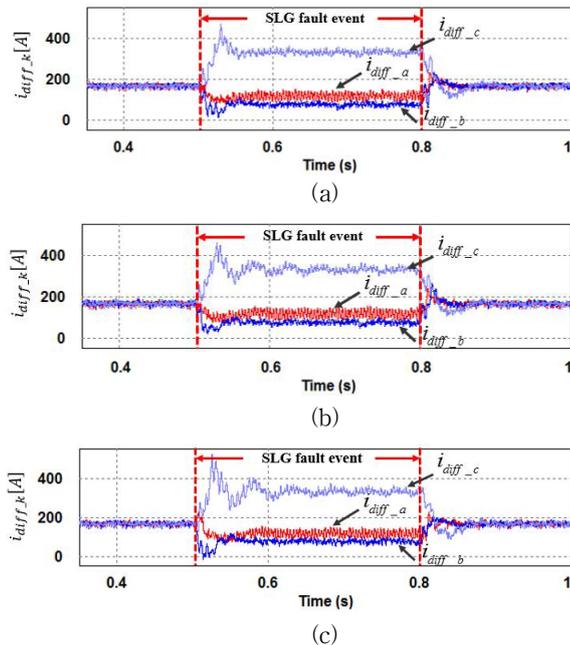


그림 3 기존의 PI+ Quasi-Resonant 제어기 적용 시 내부 불평형 전류 : (a) $\omega_c = 5\text{rad/s}$, $\omega_g = 60\text{ Hz}$ (b) $\omega_c = 10\text{rad/s}$, $\omega_g = 60\text{ Hz}$ (c) $\omega_c = 10\text{rad/s}$, $\omega_g = 60.5\text{ Hz}$

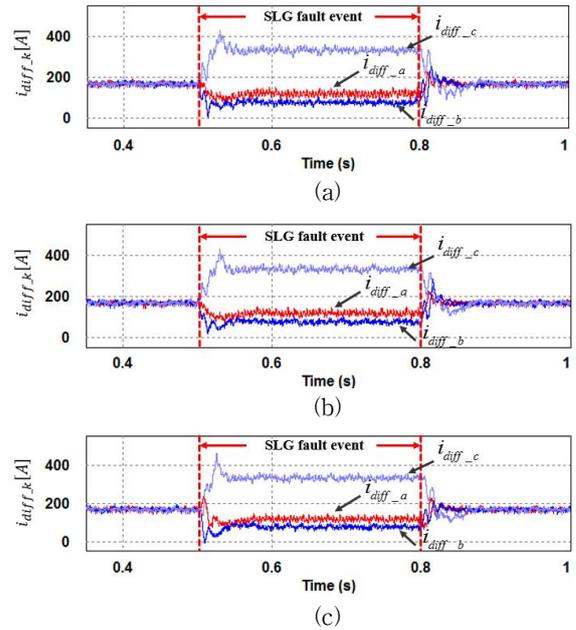


그림 4 제안한 PI+ VPI 제어기 적용 시 내부 불평형 전류 : (a) $\omega_c = 5\text{rad/s}$, $\omega_g = 60\text{ Hz}$ (b) $\omega_c = 10\text{rad/s}$, $\omega_g = 60\text{ Hz}$ (c) $\omega_c = 10\text{rad/s}$, $\omega_g = 60.5\text{ Hz}$

시뮬레이션 결과 기존의 제어기를 사용하였을 경우보다 제안한 VPI 제어기를 순환전류 제어에 적용하였을 때 주파수 변동에 강한 특성을 보임을 확인할 수 있다. 기존의 제어기는 주파수 변동에 강인하게 설계하기 위해 공진 주파수 ω_c 의 대역폭을 5rad/s 에서 10rad/s 로 설정하면 위상여유가 45도에서 39도로 감소를 하게 되는 특성이 있어 과도상태 응답 특성이 좋지 않다. 반면, VPI 제어기를 적용하면 ω_c 의 대역폭을 넓게 선정하더라도 위상여유는 90도를 확보하게 되어 과도상태 응답 특성의 저하가 없다. 또한 계통 주파수가 +0.5Hz 변동 시 기존의 제어기는 입력 대비 출력 값이 높게 나오는 반면, 제안한 방식을 적용하면 입력 대비 출력 값의 변동이 거의 없다.

4. 결론

본 논문에서는 VPI 제어기를 적용한 순환전류 제어 기법을 제안하였고 기존의 제어기와 성능을 비교하였다. VPI 제어기를 순환전류 제어에 적용하면 주파수 변동에 강인하게 설계하기 용이하며, 계통 전압 단상지락 상황에서 기존의 제어기에 비해 과도상태 응답특성이 우수함을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] S. Li, X. Wang, Z. Yao, T. Li, and Z. Peng, "Circulating current suppressing strategy for MMC HVDC based on nonideal proportional resonant controllers under unbalanced grid conditions," IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 1, pp. 387–397, Jan. 2015.
- [2] Q. N. Trinh and H. H. Lee, "An advanced current control strategy for three phase shunt active power filters," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 12, pp. 5400–5410, Dec. 2013.