

불평형 계통전압 조건에서 MMC-HVDC 시스템의 순환전류 제어기 비교

김의진, 김시환, 김래영[†]
한양대학교

Comparison of Circulating Current Controllers for Modular Multilevel Converter – HVDC System Under Unbalanced Grid Conditions

Ui-Jin Kim, Si-Hwan Kim, Rae-Young Kim[†]
Dept. of Electronic Engineering, Hanyang University

ABSTRACT

본 논문에서는 불평형 계통 전압환경에서 모듈형 멀티레벨 컨버터 기반의 고압 직류 송전시스템(MMC-HVDC, Modular Multilevel Converter – High Voltage Direct current)의 순환전류 제어를 위해 PI(Proportional Integral), PR(Proportional resonant), Deadbeat 제어를 적용하여 각 제어기 성능을 비교 검증 한다.

단상 지락 사고 (Single Line to Ground fault) 조건에서 순환 전류 제어 알고리즘을 검토하고, 발생하는 순환전류의 크기와 고조파 양상을 PSIM을 이용하여 시뮬레이션 검증을 하였다.

1. 서론

최근 전력 네트워크와 시장에서 지속적으로 각광을 받고 있는 MMC 기반 HVDC 시스템은 본질적으로 컨버터 내부 순환전류가 발생하는데 이를 적절히 제어하지 않을 경우 암전류의 크기가 증가하여 손실이 증가할 수 있다. 또한 계통 전원의 지락 사고와 같은 불평형 전원 환경에서는 순환 전류에 정상분, 역상분, 영상분 성분이 발생하여 전류용량 및 전압 리플의 증가 등으로 인해 효율성 및 신뢰성 저하 등의 문제가 야기되므로 이에 대한 별도의 제어 기법이 요구된다.^[1]

불평형 전원 환경에서 순환 전류 제어를 위한 다양한 방법이 제안되었는데, 본 논문에서는 PI, PR, Deadbeat 제어를 적용한 순환 전류 제어 기법을 비교 분석 한다. PI제어기는 이득 설정이 용이하여 산업계에서 가장 많이 쓰이는 방법이며, PR제어기는 불평형 환경에서 PI 제어에 비해 간단한 알고리즘으로 상용 주파수 대역에서 비교적 높은 수준으로 정상상태 오차를 줄일 수 있다. 한편 Deadbeat 제어기는 과도 응답성이 빠른 장점이 있다. 본 논문에서는 dq 좌표계 상에서의 PI 제어, αβ 좌표계 상에서의 PR 제어, abc 좌표계 상에서의 Deadbeat 제어 알고리즘 비교 및 분석을 위해 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 수행하고 결과를 비교 검토하였다.

2. 본론

2.1 MMC 시스템의 순환전류 해석 및 제어

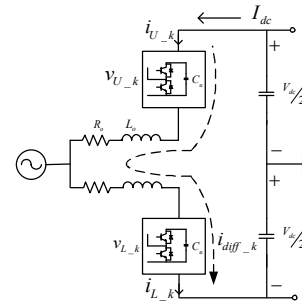


그림 1. 단상-MMC 등가회로
Fig 1. Single phase – MMC equivalent circuit

그림 1은 단상 MMC의 모식도이고 식 (1)은 MMC의 내부 불평형 전압을 나타내는 방정식이다.

$$u_{diff_k} = L_o \frac{di_{diff_k}}{dt} + R_o i_{diff_k} = \frac{1}{2} [V_{dc} - (v_{U_k} + v_{L_k})] \quad (k = a, b, c) \quad (1)$$

내부 불평형 전류 성분은 다음과 같다.

$$i_{diff_k} = \frac{i_{U_k} + i_{L_k}}{2} = \frac{I_{dc}}{3} + i_{cir_k} \quad (2)$$

여기서 i_{cir_k} 는 내부 불평형 전류의 ac성분이다.

불평형 전류의 ac성분 제어를 위한 암전압 지령값은 식 (3)과 같다.

$$v_{U_k} = \frac{V_{dc}}{2} - e_k - u_{diff_k}^*, \quad v_{L_k} = \frac{V_{dc}}{2} + e_k - u_{diff_k}^* \quad \left(e_k = \frac{v_{L_k} - v_{U_k}}{2} \right) \quad (3)$$

본 논문에서 비교 하고자 하는 3가지 순환전류 제어기의 폐루프 제어 블록도는 그림 2와 같다.

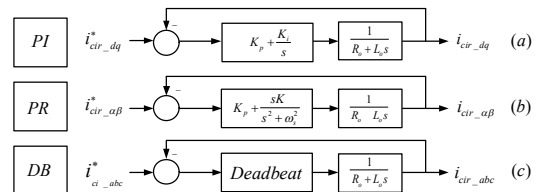


그림 2. 순환전류 제어기의 제어 블록도 (a)PI (b)PR (c)Deadbeat
Fig 2. Block diagram of circulating current control (a)PI (b)PR (c)Deadbeat

2.2 단상 지락 시 순환전류 제어 알고리즘 비교

단상 지락 시 순환전류 제어를 위해 PI제어기를 이용하는 경우 정상분, 역상분, 영상분 성분을 감쇄시키기 위해 dq 좌표계 상에서 정상분 순환전류 제어기 (PSCC), 역상분 순환전류 제어기 (NSCC), 영상분 순환전류 제어기 (DCVRSC) [2]를 각각 병렬로 구성하여 제어 전압값을 출력한다. 불평형 계통 전압 환경에서 PI 제어를 적용한 순환 전류 제어 블록도는 그림 3과 같다.

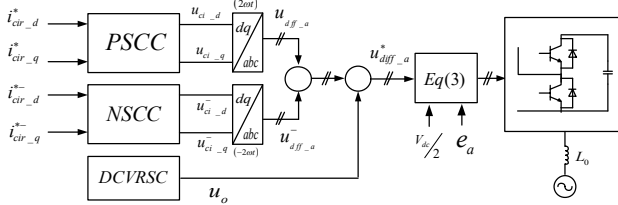


그림 3. 불평형 계통환경에서 PI 제어를 이용한 순환 전류 제어 방법
Fig 3. Circulating current control algorithm using PI control under unbalanced grid conditions

PI제어 방법의 경우 정상분, 역상분 성분을 제어하기 위해 각 성분 별 제어기가 필요하나 PR 제어기의 경우 정상분과 역상분 성분을 구분하여 제어 할 필요가 없다. 따라서 PI 제어에 비해 제어 구조가 단순하다. [1]

불평형 계통전압환경에서의 제어 블록도는 다음과 같다.

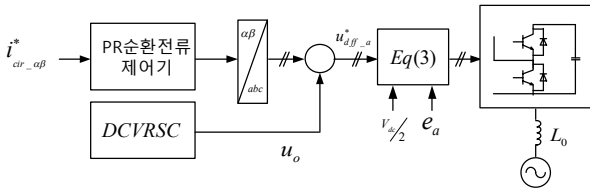


그림 4. 불평형 계통환경에서 PR 제어를 이용한 순환 전류 제어 방법
Fig 4. Circulating current control algorithm using PI control under unbalanced grid conditions

Deadbeat 제어는 ZOH(Zero-older-hold)를 포함한 Hold Equivalence 근사화 기법을 이용하여 플랜트 전달 함수를 구한 후, 페루프 전달함수가 1/z이 되도록 제어기 전달함수를 구하는 방법이다.

Deadbeat 제어를 적용하여 순환 전류 제어를 하는 경우 좌표 변환 없이 abc 좌표계 상에서 제어하므로 제어 구조가 간단해지고 과도응답과 동특성이 빠른 장점이 있다.

불평형 계통전압환경에서의 제어 블록도는 다음과 같다.

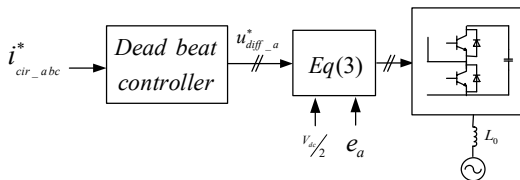


그림 5. 불평형 계통환경에서 DB 제어를 이용한 순환 전류 제어 방법
Fig 5 Circulating current control algorithm using PI control under unbalanced grid conditions

3. 시뮬레이션 결과

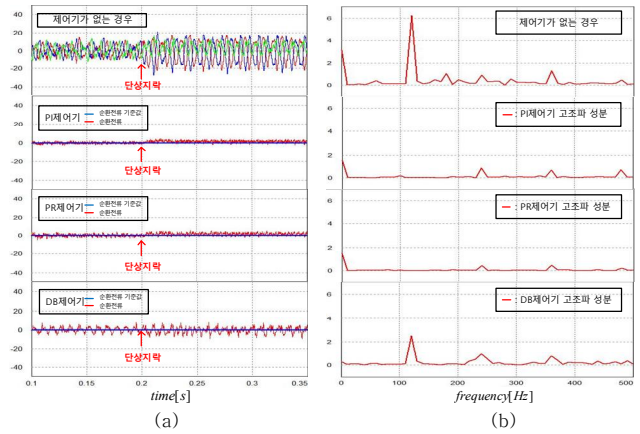


그림6. 시뮬레이션 결과 (a) 순환전류 크기, (b) 순환전류 고조파
Fig 6. Simulation results (a) Magnitude of circulating current, (b) Harmonics of circulating current

알고리즘 비교를 위해 PSIM을 이용하여 직류 단자전압 1000V, 암 인덕터 2mH 조건에서 11레벨 MMC-HVDC 시스템의 시뮬레이션을 수행하였으며, t=0.2초에 단상 지락을 발생시켜 불평형 계통에서 순환 전류 제어 알고리즘의 성능을 비교 분석하였다.

그림 6(a)에서 PI 제어와 PR 제어의 경우 순환 전류의 크기가 서로 비슷한 반면, Deadbeat 제어의 경우 다른 두 제어 방법에 비해 상대적으로 큰 순환전류가 나타났다. PI 제어와 PR 제어의 경우 제어를 하지 않은 경우보다 평형 계통에서는 약 79%, 불평형 계통에서는 약 76.7% 정도 순환 전류의 크기가 감소되었다.

그림 6(b)는 불평형 계통 전압 환경에서 순환 전류의 고조파 성분을 보여준다. PR 제어의 감쇄 성능이 가장 우수하게 나타났으며, PI제어, Deadbeat 제어 순으로 성능이 우수하였다. 2고조파의 경우 제어를 하지 않은 경우에 비해 PI 제어는 96.8%, PR 제어는 98.4%, Deadbeat 제어는 64% 정도 크기가 줄어들었다.

4. 결론

본 논문에서는 불평형 계통 전압 조건에서 MMC-HVDC 시스템의 3가지 순환전류 제어기 성능을 비교하였다. PI 제어기의 경우 맥동성분 감소 및 고조파성분의 감쇄에 우수했으나 상대적으로 제어 구조가 복잡하였다. 이에 비해 PR 제어기는 상대적으로 간단한 제어 구조로 PI 제어에 비해 더 우수한 성능을 보였다. Deadbeat 제어기의 경우 제어 구조가 간단한 반면 가장 낮은 제어 성능을 나타냈다.

참고 문헌

- [1] Li, Shaohua, et al. "Circulating current suppressing strategy for MMC-HVDC based on nonideal proportional resonant controllers under unbalanced grid conditions." Power Electronics, IEEE Transactions on 30.1 (2015): 387-397.
- [2] Tu, Qingrui, et al. "Suppressing DC voltage ripples of MMC-HVDC under unbalanced grid condit ons." Power Delivery, IEEE Transactions on 27.3 (2012): 1332-1338.