

불평형 전압 조건에 강인한 모듈형 멀티레벨 컨버터의 순환전류 억제기법

문지우\*, 박정우, 강대욱, 김장목\*\*  
한국전기연구원\*, 부산대학교\*\*

Robust Circulating Current Control in MMC Under the Unbalanced Voltage Condition

Ji-Woo Moon, Jung-Woo Park, Dae-Wook Kang, Jang-Mok Kim  
Korea Electrotechnology Research Institute\*, Pusan National University\*\*

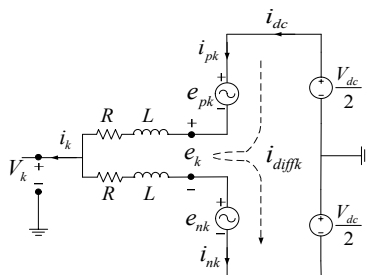
**Abstract** - This paper proposes parameter design principle of the sub-module capacitance, Arm inductance and a control method to reduced the circulating currents in modular multilevel converter(MMC) under unbalanced voltage conditions. Under balanced voltage conditions, only negative-sequence circulating currents exist. Consequently, the conventional method has considered only negative-sequence circulating currents in MMC. However, under unbalanced voltage conditions, there are positive-sequence, zero-sequence and negative-sequence circulating currents in MMC. Thus, under unbalanced voltage conditions, a control method should consider these all components. This study proposes the control method to reduced the circulating currents under the unbalanced voltage.

1. 서 론

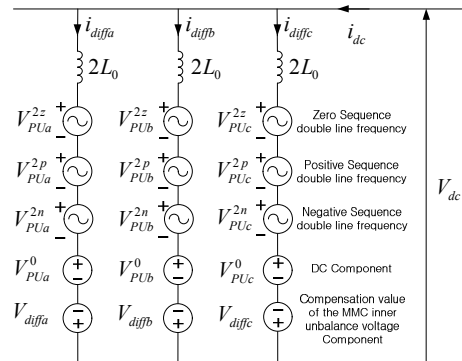
본 논문은 불평형 전압 조건에 강인한 모듈형 멀티레벨 컨버터의 순환전류 억제기법에 대하여 제안한다. 순환전류는 스위칭 소자 및 다이오드에 흐르는 전류를 증가시켜, 손실을 증가시킨다. 따라서 일반적으로 순환전류를 0으로 제어하여 손실을 최소화 시키는 방향으로 순환전류 제어를 구성하게 된다. 정상전압 조건에서 순환전류는 기본파 주파수의 두 배로 회전하는 역상분 성분만 존재하기 때문에 기존의 제어기법의 경우 역상분 순환전류 성분만을 고려하여 순환전류를 제어하였다. 하지만 불평형 전압이 발생하게 되면 순환전류는 역상분 성분뿐만 아니라, 정상분, 영상분 성분도 발생하게 된다. 따라서 불평형 전압 조건에서 순환전류를 안정적으로 제어하기 위해서는 순환전류의 역상분 성분뿐만 아니라 정상분 및 영상분 성분의 순환전류도 고려하여 순환전류 제어를 구성하여야 한다. 본 논문에서는 기존 제어기보다 간단한 제어구조를 가지면서도 영상분, 역상분, 정상분 성분의 순환전류를 제어할 수 있는 새로운 순환전류 제어기법에 대하여 제안하였다.

2. 순환전류

그림 1은 모듈형 멀티레벨 컨버터의 단상 등가회로를 보여준다.[1-5] 여기서  $e_{pk}$ ,  $e_{nk}$ 는 상단 및 하단 Arm의 기전력이며,  $V_{dc}$ 는 DC-link 전압,  $i_{dc}$ 는 DC-link 전류,  $i_{pk}$ 와  $i_{nk}$ 는 상단 및 하단 Arm 전류,  $i_{diffk}$ 는 상단과 하단 Arm에 공통으로 흐르는 내부 불평형 전류(inner unbalance current),  $i_k$ 는 모듈형 멀티레벨 컨버터의 AC측 전류,  $V_k$ 는 모듈형 멀티레벨 컨버터의 AC측 계통전압을 나타낸다. 모듈형 멀티레벨 컨버터의 AC측 전압 방정식은 식 (1)과 같으며 내부 불평형 전류는 식 (2)와 같이 정의된다. 모듈형 멀티레벨 컨버터의 AC측 기전력은 상단과 하단 기전력의 차로 정의되며 식 (3)과 같이 정의 된다. 또한 모듈형 멀티레벨 컨버터의 내부 불평형 전류는 식 (4), (5)와 같이 정의되며 여기서  $i_{zk}$ 는 순환전류로써 제거 되어야 하는 성분이다.



〈그림 1〉 모듈형 멀티레벨 컨버터의 단상 등가회로



〈그림 2〉 불평형 전압 조건에서의 모듈형 멀티레벨 컨버터 등가회로

$$V_k = e_k - \frac{L}{2} \frac{di_k}{dt} - \frac{R}{2} i_k \tag{1}$$

$$L \frac{di_{diffk}}{dt} + Ri_{diffk} = \frac{V_{dc}}{2} - \frac{e_{pk} + e_{nk}}{2} \tag{2}$$

$$e_k = \frac{e_{nk} - e_{pk}}{2} \tag{3}$$

$$i_{diffk} = \frac{i_{pk} + i_{nk}}{2} \tag{4}$$

$$i_{diffk} = \frac{i_{dc}}{3} + i_{zk} \tag{5}$$

그림 2은 불평형 전압 조건에서의 모듈형 멀티레벨 컨버터의 등가회로를 보여준다. 정상전압 조건에서는 기본파 주파수의 두 배의 역상분 성분, DC 성분, 순환전류 제어 전압의 성분만 존재하지만[1],[2],[4],[5] 불평형 전압이 발생하게 되면 AC측 전류의 제어기법에 따라 영상분 성분이 추가되거나[4], 영상분 및 정상분 성분이 나타나게 된다.[1],[5] 따라서 AC측 전류의 제어기법에 상관없이 순환전류 성분을 안정적으로 제어하기 위해서는 순환전류의 역상분 성분뿐만 아니라 영상분 및 정상분 성분도 고려하여야 불평형 전압 조건에서도 순환전류를 안정적으로 제어할 수 있다.

3. 제안한 순환전류 제어기법

불평형 전압 조건에서도 순환전류를 안정적으로 제어하기 위해서는 순환전류의 역상분 성분뿐만 아니라 영상분 성분, 정상분 성분을 제어하기 위한 각각의 제어기가 필요하다. 하지만 DVCC(Dual Vector Current Control)와 같이 각각의 성분들을 고려하여 제어하기 위해서는 각각의 성분으로 분리하기 위한 노치필터와 PI 제어기가 필요하기 때문에 제어 구조가 복잡해지게 된다. 따라서 본 논문에서는 삼상 정지 좌표계에서 PIR 제어를 통하여 내부 불평형 전류를 제어함으로써 순환전류를 제어하는 제어기법을 적용하였다. 삼상 정지 좌표계에서 순환전류를 제어하면 정상분 성분과 역상분 전류, 영상분 성분의 분리 없이 각각의 성분을 제어할 수 있는 장점을 가지게 된다. 식 (5)에서 내부 불평형 전류는 DC-link 전류성분과 순환전류 성분으로 구분되기 때문에 내부 불평형 전류를 DC-link 전류 성분 지령치로 제어하면 순환전류 성분을 0으로 제어할 수 있다. 여기서 DC-link 전류 성분 지령치는 식 (6), (7)에서와 같이 구할 수 있다. 모듈형 멀티레벨 컨버터의 손실이 없다고 가정하면 DC측 유효전력과 AC측 유효전력이 동일하다고 가정할 수 있다. AC측 유효전력은 계통측 전압 및 전류의 측정을 통하여 알고 있는 값이므로

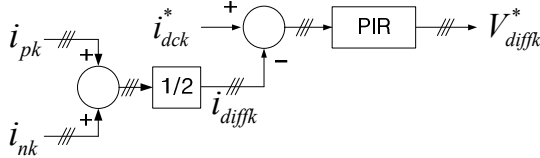
식 (7)을 통하여 DC-link 전류 지령치를 구할 수 있다.

그림 3은 제안한 순환전류 제어기를 보여준다. 좌표변환을 실시하지 않기 때문에 제어기의 구조가 간단해진 것을 확인할 수 있다. 내부 불평형 전류는 DC 성분과 기본파 주파수의 두 배의 성분만 존재하기 때문에 R 제어기는 기본파 주파수의 두 배로 설정하였다.[5]

$$P_k = P_{dck} = V_{dc} i_{dck} \quad (6)$$

$$i_{dck}^* = P_{dck} / V_{dc} \quad (7)$$

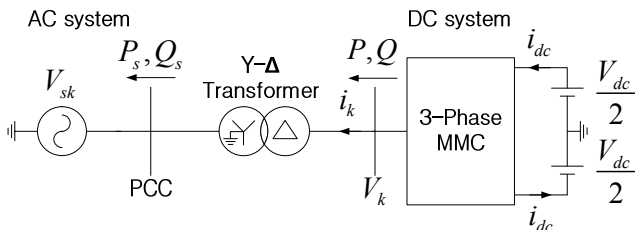
$$V_{diffk}^* = PIR [i_{dck}^* - i_{diffk}] \quad (8)$$



〈그림 3〉 제안된 순환전류 제어기법

#### 4. 시뮬레이션

시뮬레이션은 PSCAD/EMTDC를 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션에 사용한 파라미터는 표 1과 같다. PWM 방식 및 서브 모듈의 커패시터 전압 발란싱 알고리즘은 참고문헌[2]의 modified PSC-PWM 방식을 이용하였다. 불평형 전압은 0.7s에서 계통에 한상 지락을 발생시켜 불평형 전압을 인가하였다. 계통과 모듈형 멀티레벨 컨버터는 Y-Δ 변압기를 통하여 연결되기 때문에 실제 모듈형 멀티레벨 컨버터에 인가되는 전압은 두 상의 전압이 감소된 형태로 나타난다.



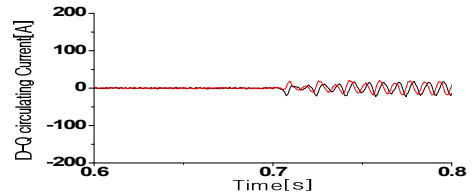
〈그림 4〉 모듈형 멀티레벨 컨버터의 시뮬레이션 구조

그림 5는 불평형 전압 조건에서의 D-Q축 순환전류를 보여준다. 그림 (a)는 동기좌표계에서 역상분 성분의 순환전류만을 제어하기 때문에 정상전압 조건에서는 순환전류 성분이 0으로 제어되나 불평형 전압이 발생하게 되면 리플이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 그림 (b)의 경우 불평형 전압 발생 조건에서 리플이 발생하는 것은 하지만 시간이 지남에 따라 안정적으로 제어되는 것을 확인할 수 있다.

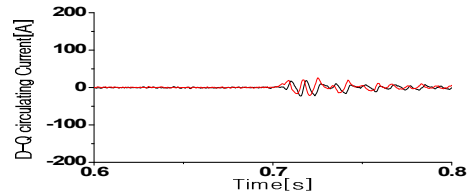
그림 6은 불평형 전압 조건에서 내부 불평형 전류를 보여준다. 기존 제어기법의 경우 순환전류의 역상분 성분만을 제어하기 때문에 내부 불평형 전류에 영상분 성분 및 정상분 성분의 순환전류와 불평형 전압 투입에 따른 과도 리플이 크게 존재하는 것을 확인할 수 있다. 또한 DC-link 전류는 각각의 내부 불평형 전류의 합이므로 DC-link 전류에도 큰 과도 리플이 발생하는 것을 알 수 있다. 하지만 제안한 순환전류 제어기법의 경우 내부 불평형 전류의 직접적인 제어를 통하여 불평형 전압 투입 시에도 과도 전류를 안정적으로 제어하며, 순환전류 또한 안정적으로 제어되고 있는 것을 확인할 수 있다.

〈표 1〉 시뮬레이션 파라미터

Item	Values
Active Power	4MW
AC System Voltage	11500V
DC Bus Voltage	20kV
DC Resistance	0.1ohm
Number of sub-modules per arm	10
sub-module Capacitance	0.002F
sub-module Capacitor Voltage	2000V
Arm Inductance	0.03H
Carrier Frequency	500Hz

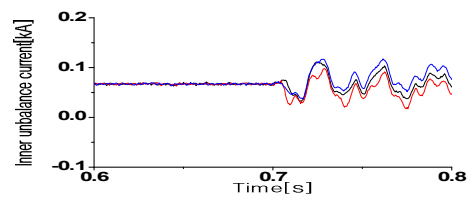


(a) 기존의 순환전류 제어기법[2]

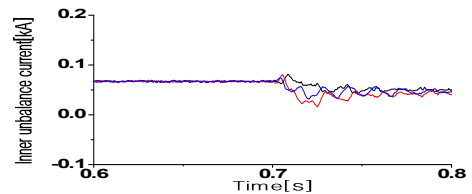


(b) 제안한 순환전류 제어기법

〈그림 5〉 불평형 전압 발생 시 D-Q축 순환전류



(a) 기존의 순환전류 제어기법[2]



(b) 제안한 순환전류 제어기법

〈그림 6〉 불평형 전압 발생 시 각상의 내부 불평형 전류

#### 5. 결 론

현재 HVDC 시스템에 대한 수요가 증가하고 있으며 그중에서도 무효전류를 흡수, 생산이 모두 가능하며, 무효전류와 유효전류를 독립적으로 제어할 수 있으며, 정전 시에도 정전압 제어를 통하여 별도의 추가 시스템 없이 기동이 가능한 전압형 HVDC 시스템에 관한 관심이 증가하고 있다. 본 논문은 모듈형 멀티레벨 컨버터를 적용한 전압형 HVDC 시스템의 문제점이라 할 수 있는 순환전류를 정상 전압 조건뿐만 아니라 불평형 전압 조건 및 불평형 부하 조건에서도 안정적으로 억제하는데 제어기법을 제안함에 따라 향후 모듈형 멀티레벨 컨버터를 적용한 HVDC 시스템의 안정적인 운전에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 〈참 고 문 헌〉

- [1] Ji-Woo Moon, "Circulating Current Control in MMC Under the Unbalanced Voltage" IEEE Transactions on. Power Delivery, vol. 28, Issue: 3, pp. 1952 - 1959, 2013.
- [2] Q. Tu, Z. Xu, and L. Xu, "Reduced switching-frequency modulation and circulating current suppression for modular multilevel converters" IEEE Trans. Power Del., vol. 26, no. 3, pp. 2009 - 2017, Jul. 2011.
- [3] M. Saeedifard and R. Iravani, "Dynamic performance of a modular multilevel back-to-back HVDC system" IEEE Trans. Power Delivery, vol.25, no. 4, pp. 2903 - 2912, Oct. 2010.
- [4] Qingrui Tu, Zheng Xu, Yong Chang and Li Guan, "Suppressing DC Voltage Ripples of MMC-HVDC Under Unbalanced Grid Conditions" IEEE Transactions on. Power Delivery, Volume: 27, Issue: 3, pp. 1332 - 1338, 2012.
- [5] 문지우, "불평형 전압 조건에 강인한 모듈형 멀티레벨 컨버터의 순환전류 억제기법" 부산대학교 박사학위 논문, 2014