

# MMC 시스템에서 데드타임의 영향과 보상 기법 연구

서인교, 이광해, 김장목  
부산대학교 전기공학과

## A Study of Deadtime Effect and Compensation Algorithm on MMC System

Seo In Kyo, Lee Kwang Hae, Kim Jang Mok  
Department of Electrical Engineering, Pusan National University

### ABSTRACT

본 논문에서는 MMC 시스템에서 데드타임에 의한 전압 왜곡 현상을 수식적으로 분석하여 발생하는 고조파 성분을 보상하는 새로운 데드타임 보상기법을 제안한다. 알고리즘은 시뮬레이션으로 그 타당성을 검증하였다

### 1. 서 론

스위치의 단락 방지를 위한 데드타임 인가는 매 스위칭마다 서브모듈이 출력하는 전압에 오차를 발생시키고 이는 최종적으로 출력 왜곡 현상을 발생시킨다. 이러한 오차를 보상하기 위해 오차 성분을 미리 계산하여 Feed Forward 형태로 제어하는 방식 등이 있지만 이는 실제 시스템에서 오차 성분에 변동이 발생하는 경우 정확한 보상이 이루어질 수 없다. 따라서 데드타임에 의한 오차성분을 수식적으로 분석하여 동기좌표계에서 Feed Back 제어를 하는 새로운 보상 기법을 제안한다. 이를 통해 데드타임에 의한 출력 왜곡을 효과적으로 보상 가능하며 이는 시뮬레이션으로 타당성을 검증하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 MMC 시스템 토폴로지와 모델링<sup>[1]</sup>

그림 1은 일반적인 MMC 시스템의 토폴로지이다. 3상 컨버터/인버터 동작을 위해 3개의 레그로 구성되며 각각의 레그는 상,하단 암으로 구성된다. 암은 직렬로 연결된 서브모듈로 구성되며 본 논문에서는 하프 브리지 서브모듈을 사용한 MMC 시스템에 대해 해석한다.

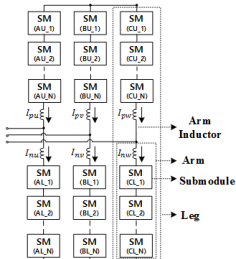


그림 1 MMC 시스템 토폴로지

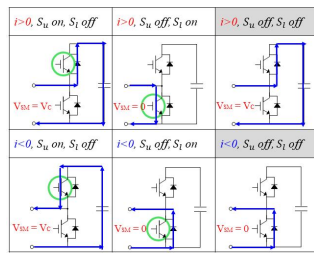


그림 2 스위칭 상태에 따른 전류 흐름

$$i_{arm} > 0, +V_c(T_d + T_{on} - T_{off}) \quad (1)$$

$$i_{arm} < 0, -V_c(T_d + T_{on} - T_{off}) \quad (2)$$

#### 2.2 데드타임에 의한 전압 왜곡 분석 - 서브모듈<sup>[2]</sup>

그림 2는 각 서브모듈의 스위칭 상태에 따른 전류의 흐름을 나타낸다. 전류가 커패시터를 충전시키는 방향을 양의 방향으로 정의한다. 서브모듈의 상 하단 스위치가 모두 오픈된 데드타임 동안에는 암 전류의 방향에 따라 역 도통 다이오드를 통해 전류가 흐름을 확인 할 수 있다. 그림 3은 스위칭 상태와 암 전류 방향에 따른 서브모듈 출력 전압의 그림이다. 이상적인 상 하단 스위칭 패턴에 따라 인가되어야 하는 전압은  $V_{SM,ideal}$ 과 같다. 하지만 실제 스위치에서 데드타임( $T_d$ ), 턴온 딜레이( $T_{on}$ ) 그리고 턴오프 딜레이( $T_{off}$ )가 존재하므로 인가되는 전압  $V_{SM,real}$ 의 크기에 오차가 발생한다. 이 오차는 암 전류의 방향에 따라 달라지는데, 암 전류가 양일 경우와 음일 경우 붉은색 빗금 친 영역( $T_{off}$ 에 의한 오차)과 푸른색 빗금 친 영역( $T_{on}, T_d$ 에 의한 오차)만큼이 오차로 발생하게 된다. 그 관계는 식 (1), (2)와 같다.

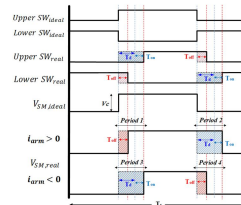


그림 3 스위칭 상태와 암 전류 방향에 따른 서브모듈

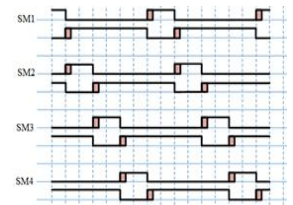


그림 4 5레벨 MMC의 한 암에서  $T_D$ 를 서브모듈 출력 전압

#### 2.3 데드타임에 의한 전압 왜곡 분석 - 암

그림 3은 한 암에서  $T_D$ 를 고려한 서브모듈 출력 전압을 도식화 한 것이다. 해당 MMC 시스템은 5레벨 PSC(Phase Shift Carrier) 모듈레이션 기법을 사용하여 각 서브모듈은 동일한 이용율을 가지고 커패시터 전압의 밸런싱이 이루어진다. 암 전압은 해당 암의 서브모듈 출력전압의 합으로 정의한다. 각 서브모듈에 의해 인가되는 커패시터 전압은 그림 4와 같이 동일한 오차를 포함하고 위상이 천이된 형태로 나타난다. 전류의 방향이 양인 경우 한 암에서 한 주기 동안 발생하는 평균적인 오차를 계산하면 아래 식과 같다. Q는 전류의 방향이 양인 경우 1, 음인 경우 -1로 정의한다.

$$\Delta V_{DT,Pos} = \Delta V_{1T,SM} \frac{SW_{pos}}{T_{pos}} N = V_c \frac{T_D}{T_c} N \quad (3)$$

$$\Delta V_{DT} = Q \sum_{k=1}^N V_C \frac{T_D}{T_C} \quad (4)$$

## 2.4 데드타임에 의한 전압 왜곡 분석 - dq좌표계<sup>[3]</sup>

그림 5 a,b는 상 하단 암 전류에 따라 암 전압에 발생하는 평균 오차를 나타낸 것이다. 상단과 하단의 전압 오차는 그림 5 a,b 와 같이 180도의 위상차를 가진다.

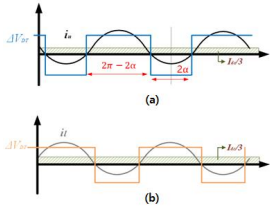


그림 5 (a)상단 암 전류와 전압 오차  
(b)하단 암 전류와 전압 오차

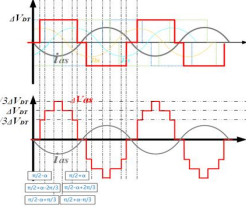


그림 6 A상 극전압 오차와 상전압 오차

극전압 오차와 부하에 인가되는 상전압 오차는 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. dq 정지좌표계 상전압 오차를 푸리에 급수로 표현 가능하다. 이러한 오차 전압은 부하임피던스에 의해 dq 정지좌표계 상전류 오차로 발생하고 출력전류와 중첩되어 파형을 왜곡시킨다. 정지좌표계 전류 오차는 식 (3), (4)와 같이 표현된다

$$\Delta I_{ds}^s = \frac{4\Delta V_{DT}}{\pi Z_L} [K_{q1} \sin(x-\varphi) + \frac{K_{q5}}{5} \sin 5(x-\varphi) + \frac{K_{q7}}{7} \sin 7(x-\varphi) + \frac{K_{q11}}{11} \sin 11(x-\varphi) + \frac{K_{q13}}{13} \sin 13(x-\varphi) \dots] \quad (3)$$

$$\Delta I_{qs}^s = \frac{4\Delta V_{DT}}{\pi Z_L} [-K_{q1} \cos(x-\varphi) + \frac{K_{q5}}{5} \cos 5(x-\varphi) - \frac{K_{q7}}{7} \cos 7(x-\varphi) + \frac{K_{q11}}{11} \cos 11(x-\varphi) - \frac{K_{q13}}{13} \cos 13(x-\varphi) \dots] \quad (4)$$

## 2.5 제안하는 데드타임 오차 보상 기법

dq 동기 좌표계에서 나타나는 데드타임에 의한 오차 성분을 추출하여 제거하는 보상기를 제안한다. 데드타임에 의한 전류 왜곡은 DC성분, 6차, 12차의 전류왜곡으로 나타난다. 이 때 DC성분은 PI제어기에 의해 제거되고 12차 이상의 성분은 그 크기가 작으므로 무시한다. 제어기 내에 오차 변동이 적은 적분기 출력에서 밴드패스 필터를 사용하여 6차 오차성분만 검출하여 보상한다. dq 전압 보상 지령은 식 (5), (6)으로 구할 수 있다. 보상 알고리즘의 제어도는 그림 7과 같다.

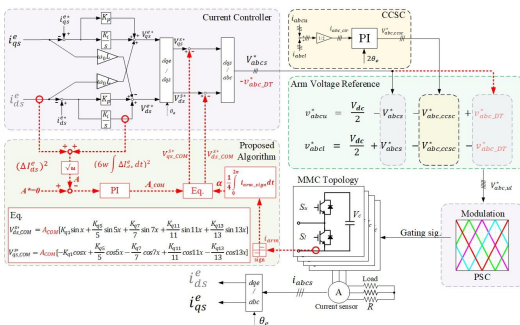


그림 7 제안하는 데드타임 보상 알고리즘 제어도

$$\Delta V_{ds}^{s*} = A_{COM} [K_{q1} \sin x + \frac{K_{q5}}{5} \sin 5x + \frac{K_{q7}}{7} \sin 7x + \frac{K_{q11}}{11} \sin 11x + \frac{K_{q13}}{13} \sin 13x] \quad (5)$$

$$\Delta V_{qs}^{s*} = A_{COM} [-K_{q1} \cos x + \frac{K_{q5}}{5} \cos 5x - \frac{K_{q7}}{7} \cos 7x + \frac{K_{q11}}{11} \cos 11x - \frac{K_{q13}}{13} \cos 13x] \quad (6)$$

$$\int_0^{2\pi} i_{arm\_sign} = 2\pi - 4\alpha = 4(\frac{\pi}{2} - \alpha) \quad (7)$$

## 2.6 시뮬레이션

제한한 데드타임 보상 알고리즘은 MATLAB Simulink를 이용하여 검증한다. 표 1은 시뮬레이션 파라미터와 제어 조건이다. 그림 8과 9는 보상 전 후의 출력전류 dq정지좌표계 파형과 FFT 분석이다.

표 1 시뮬레이션 파라미터

Simulation Parameter	
Number of SM(ea) per arm	4
DC link voltage(V)	100
Arm inductance(mH)	5
SM capacitance(uF)	2200
Carrier Frequency(kHz)	10
Load(ohm, mH)	10, 5
Output Current(A)	1
Deadtime(us)	5

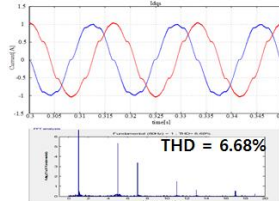


그림 8 보상 전의 출력 전류 dq 정지 좌표계 파형과 THD(6.68%)

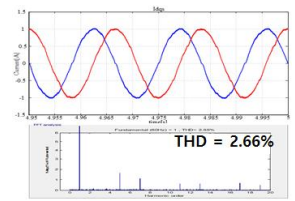


그림 9 보상 전의 출력 전류 dq 정지 좌표계 파형과 THD(2.66%)

## 3. 결론

본 논문은 MMC 시스템에서의 데드타임에 의한 출력 왜곡에 대하여 해석하고 이를 보상하는 새로운 보상기법을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 기존의 데드타임 보상 기법과 달리 오차성분에 의한 출력 고조파 왜곡을 수직적 해석을 통해 보상하므로 데드타임 뿐만 아니라 출력에 오차를 발생시키는 턴온, 턴오프 딜레이에 의한 왜곡도 효과적으로 보상 할 수 있다. 알고리즘의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

## 참고 문헌

- [1] U. N. Gnanarathna, A. M. Gole, R. P. Jayasinghe, "Efficient modeling of modular multilevel HVDC converters (MMC) on electromagnetic transient simulation program," IEEE Trans., Power Delivery, vol. 26, no. 1, pp. 316-324, 2011.
- [2] Baichao Chen, Yaojun Chen, Cuihua Tian, Jiaxin Yuan and Xiu Yao "Analysis and Suppression of Circulating Harmonic Currents in a Modular Multilevel Converter Considering the Impact of Dead Time"
- [3] 황선환 "PWM 인버터의 데드타임 보상에 관한 연구" 부산대학교 석사학위 논문 2006.02