

HVDC 용 MMC의 새로운 오프셋 전압제어에 따른 고조파 및 순환전류 분석

김재혁, 한병문*
명지대학교 전기공학과

Harmonic Characteristics and Circulating Current Analysis of New Offset Voltage Control for MMC HVDC System

Jae-Hyuk Kim, Byung-Moon Han*
Department of Electrical Engineering, Myongji University

ABSTRACT

본 논문에서는 고압 직류송전용 MMC에 오프셋 전압 제어를 적용하는 데 있어 3고조파 주입기법과 제안하는 가변오프셋 전압 제어 기법에 따른 시스템의 고조파 특성과 순환전류 특성에 대해 비교 분석한 내용을 기술하고 있다. 제안한 가변오프셋 전압 제어는 MI(Modulation Index)에 따라 오프셋 전압의 크기를 가변 하여 MMC 출력 상전압이 항상 N+1 레벨을 형성하는 기법이다. 제안하는 기법과 3고조파 주입기법의 비교를 위해 200MW MMC HVDC 시스템에 적용하여 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션을 수행하였다. 제안한 기법은 오프셋 전압제어 적용에 따라 발생할 수 있는 고조파 특성에 있어 3고조파 주입기법에 비해 우수함을 확인하였다. 또한 제안하는 기법을 사용할 경우 오프셋 전압에 의한 4고조파 순환전류 저감이 가능함을 알 수 있었다.

1. 서 론

최근 전력전자 기술의 발전으로 MMC를 이용한 고압 직류송전 시스템은 안정적이고 효율적인 대용량 전력의 전송을 위해 점차 도입되고 있는 추세이다. MMC는 출력 전압을 형성하는 전압변조 기법에 있어 매우 다양한 방법들이 있다. 그중 3고조파 주입은 오프셋 전압 제어의 대표적인 기법으로 정현파 지령전압에 3고조파 성분의 오프셋 전압을 인가하는 방법이다. 이로써 MI가 1보다 큰 과변조 영역에서도 동적 특성을 유지하여 시스템의 안정성을 확보할 수 있다. 그 외에도 3고조파 주입기법을 적용함으로써 갖는 장점은 다음과 같다.

정현파 전압변조 기법에 비해 시스템 전압이 $2/\sqrt{3}$ 배 증가함에 따라 서브모듈을 구성하는 반도체 스위치의 전류 스트레스와 전도손실, 그리고 DC 사고전류가 줄어든다. 또한 압 에너지 변동량이 감소하여 2고조파 순환전류 성분이 감소하고, 서브모듈 커패시터 용량을 줄일 수 있는 이점이 있다^[1].

하지만 MMC에 3고조파 주입기법을 적용하면 항상 기본파의 1/6배에 해당하는 3고조파 전압이 인가되기에 전체 시스템의 고조파 특성에 적지 않은 영향을 미친다.

이에 비해 제안하는 가변오프셋 전압 제어기법은 MI에 따라 오프셋 전압이 가변 되어 3고조파 주입에 따른 악영향을 최소화 할 수 있다. 이 외에도 제안하는 기법은 중전압 어플리케이션 MMC의 출력 THD 개선에 있어 큰 효과가 있다^[1].

본 논문은 기존 오프셋 전압제어와 제안하는 기법 따른 MMC HVDC 시스템의 고조파 특성과 4고조파 순환전류 발생에 대해 시뮬레이션을 통해 분석한 내용을 기술하고 있다.

2. 제안하는 가변오프셋 전압제어

2.1 기존 전압변조 방식

그림 1은 NLC(Nearest Level Control)로 동작하는 MMC의 등가회로를 나타낸 것이다. 극전압 지령을 형성하는 방식 중에 가장 고전적인 방식은 극전압 지령을 상전압 지령과 동일하게 설정하는 정현파 전압변조 방식이 존재한다. 이 경우에는 전력변환장치가 출력 가능한 상전압의 최대치는 직류단 전압의 절반으로 한정되며 MI가 1이 될 때까지는 선형적으로 제어되지만, 그 이상에서는 비선형적으로 출력된다. 이를 개선하기 위한 방식으로 오프셋 전압을 이용한 전압변조 방식이 대표적이다.

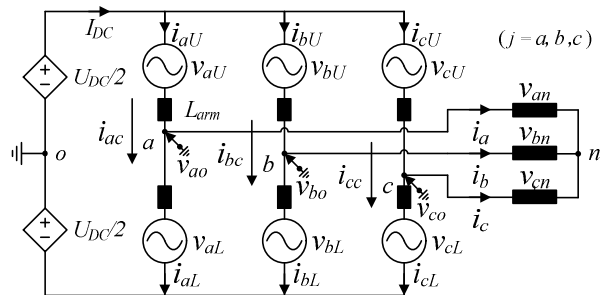


그림 1. MMC 등가회로

MMC의 출력전압인 극전압 v_j 는 각 상의 SM 상태에 따라 결정되고, 상전압 v_m 과 오프셋 전압 v_{no} 의 합으로 이루어진다.

$$v_j = v_m + v_{no} \quad (1)$$

오프셋 전압을 이용한 공간벡터를 구현하기 위해서는 식 (2)와 같이 최대 극전압과 최소 극전압의 절대 값이 동일하게 되도록 설정한다. 이로 인해 오프셋 전압은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$v_m^* a_x + v_{no} = -(v_m^* n + v_{no}) \quad (2)$$

$$v_{no} = -\frac{v_m^* a_x + v_m^* n}{2} \quad (3)$$

오프셋 전압을 이용한 공간벡터 전압변조 방식은 MI를 $2/\sqrt{3}$ 까지 선형적으로 사용 가능하여 정현파 변조 방식에 비해 15.47% 증가된 선형 제어영역을 갖는다.

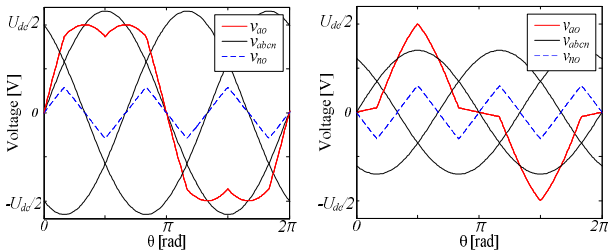
2.2 가변오프셋 전압변조 방식

NLC를 MMC에 적용한 경우 MI에 따라 출력전압 레벨이 결정되고, 레벨의 감소는 MMC의 출력 THD를 저하시키는 주요 원인이다. 이러한 문제를 극복하기 위해 MI 크기와 상관없이 극전압의 크기가 $U_{dc}/2$ 로 일정하여 출력 상전압의 전압레벨이 $N + 1$ 의 최대레벨을 유지하는 가변적인 오프셋 전압을 사용하였다. 가변오프셋 전압은 식 (4)과 같이 표현 가능하다^[1].

$$v_{no} = -\alpha \frac{v_m^+ v_m^-}{2} \quad (4)$$

오프셋 전압의 크기 변수 α 는 극전압의 크기가 일정한 최대치를 유지하기 위한 변수로 극전압의 최대값 방정식을 이용하여 산출 가능하며, MI의 영역에 따라 식 (5)로 표현된다. 그리하여 최종적으로 그림 2와 같이 MI의 모든 영역에서 극전압의 크기는 항상 $U_{dc}/2$ 를 유지한다.

$$\begin{cases} 1 < MI \leq 2/\sqrt{3} \text{인 경우: } \alpha = -\sqrt{\frac{4}{M^2} - 3} + 1 \\ 0 < MI \leq 1 \text{인 경우: } \alpha = 4 - \frac{4}{MI} \end{cases} \quad (5)$$



(a) $MI = 2/\sqrt{3}$ 인 경우 (b) $MI = 0.7$ 인 경우
그림 2. MI에 따른 극전압, 상전압, 오프셋 전압

3. 오프셋 전압제어에 의한 고조파 순환전류 분석

오프셋 전압제어 중 대표적인 방법인 3고조파 주입기법 적용에 따른 MMC의 고조파 순환전류에 대해 분석하였다. 3고조파 주입기법 적용 시, A상 출력전류는 식 (6)과 같이 표현 가능하고, 극전압은 식 (7)로 나타낼 수 있다^[2].

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}I_{DC}}{3Mf\cos\varphi} \sin(\omega t - \varphi) \quad (6)$$

$$v_{ao} = \frac{1}{\sqrt{3}}U_{DC} \times \left[MI \cdot \sin\omega t + \frac{1}{6}MI \cdot \sin 3\omega t \right] \quad (7)$$

위 수식을 이용하여 상·하단 암의 전류와 전압을 나타내면 다음 식 (8)~(11)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} i_{aU} &= \frac{1}{3}I_{DC} + \frac{1}{2}i_a = \frac{1}{3}I_{DC} \left[1 + \frac{\sqrt{3}\sin(\omega t - \varphi)}{Mf\cos\varphi} \right] \\ i_{aL} &= \frac{1}{3}I_{DC} - \frac{1}{2}i_a = \frac{1}{3}I_{DC} \left[1 - \frac{\sqrt{3}\sin(\omega t - \varphi)}{Mf\cos\varphi} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} v_{aU} &= \frac{1}{2}U_{DC} \left[1 - \frac{2}{\sqrt{3}} \left(MI \cdot \sin\omega t + \frac{1}{6}MI \cdot \sin 3\omega t \right) \right] \\ v_{aL} &= \frac{1}{2}U_{DC} \left[1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(MI \cdot \sin\omega t + \frac{1}{6}MI \cdot \sin 3\omega t \right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

상·하단 암의 전류와 전압을 곱하여 상·하단 암의 전력을

구하고, 이를 서로 더하여 교류성분에 대해 적분하면 A상의 순환하는 암 에너지를 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$w_a(t) = \int (p_{aU} + p_{aL}) dt = \frac{S}{18} \left[\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \sin(2\omega t - \gamma) + \sin(4\omega t - \varphi) \right] \quad (10)$$

$$\text{단, } \alpha = 7\sin\varphi, \beta = 5\cos\varphi, \gamma = \sin^{-1}\left(\frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}\right), S = \frac{U_{DC}I_{DC}}{\cos\varphi}$$

위 식 (10)을 통해 3고조파를 주입기법을 적용하면 2차와 4차 고조파 성분의 순환하는 암 에너지가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 결국 서브모듈 커패시터를 충·방전시키는 요소로 작용하여, 커패시터 전압에 2차와 4차의 고조파의 리플로 나타난다. 이러한 고조파 성분을 고려하면 상·하단의 암전압은 식 (11)로 다시 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{aU} &= \frac{1}{2}U_{DC} \left[1 - \frac{2}{\sqrt{3}} \left(MI \cdot \sin\omega t + \frac{1}{6}MI \cdot \sin 3\omega t \right) \right] \\ &\quad + \frac{1}{2}U_{a,2f} \sin(2\omega t - \gamma) + \frac{1}{2}U_{a,4f} \sin(4\omega t - \varphi) \\ v_{aL} &= \frac{1}{2}U_{DC} \left[1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(MI \cdot \sin\omega t + \frac{1}{6}MI \cdot \sin 3\omega t \right) \right] \\ &\quad + \frac{1}{2}U_{a,2f} \sin(2\omega t - \gamma) + \frac{1}{2}U_{a,4f} \sin(4\omega t - \varphi) \end{aligned} \quad (11)$$

2차와 4차 고조파 성분이 포함된 암전압은 암 인덕터에 의해 동일 고조파 성분의 순환전류, 식 (12)를 발생시킨다.

$$i_{ac} = I_{2f} \cos(2\omega t - \gamma) + I_{4f} \cos(4\omega t - \varphi) \quad (12)$$

4. 오프셋 전압제어에 따른 시뮬레이션 비교

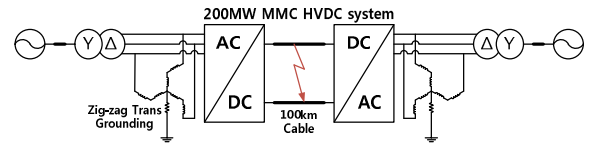


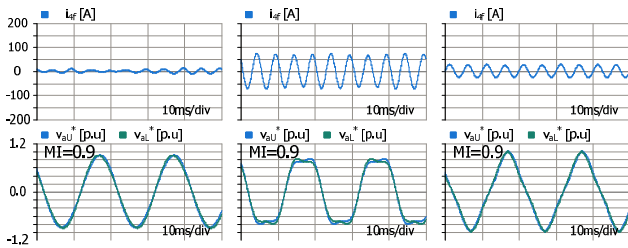
그림 3. 200MW MMC HVDC 시스템

오프셋 전압제어가 MMC HVDC 시스템에 미치는 영향을 분석하기 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 그림 3의 200MW MMC HVDC 시스템 시뮬레이션 모델을 구현하였다. 시뮬레이션 모델에 고려된 시스템 사양은 표 1에 나타내었다. 그리고 시뮬레이션 모델은 정격의 운전상태로 2고조파 순환전류 억제제어가 적용되었다.

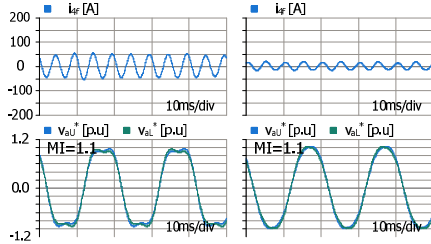
그림 4는 MI가 0.9와 1.1인 경우에 대해 각 전압변조 기법에 따른 4고조파 성분의 순환전류와 상·하단 암의 극전압 지령을 나타내고 있다. 3고조파 주입과 제안하는 기법을 적용한 경우, 정현파 기법과 달리 4고조파 순환전류 성분이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 3고조파 주입기법의 경우 MI의 1/6에 해당하는 고정된 오프셋 전압이 항상 인가되는데 비해, 제안하는 기법은 가변적으로 오프셋 전압의 크기가 적용되어 4고조파 순환전류 성분이 보다 작게 나타나는 것을 알 수 있다.

표 1. 200MW MMC HVDC 시스템 파라미터

정격전력	200MW	계통전압	100kV 50Hz
직류단 전압	200kV	SCR	15
암 당 SM 수	100개	DC 선로	100km
SM 커패시터	7500uF	변압비	100:112
SM 커패시터 전압	2.0kV	암 인덕터	0.05p.u



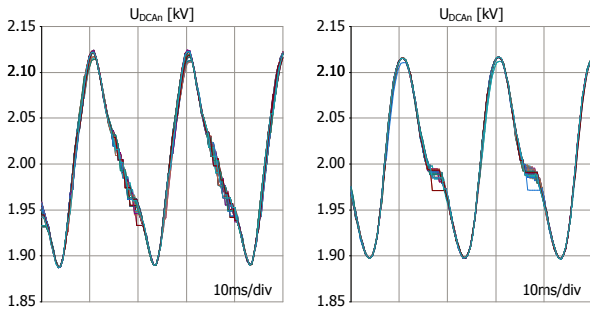
(a) 정현파(MI=0.9) (b) 3고조파(MI=0.9) (c) 제안(MI=0.9)



(d) 3고조파(MI=1.1) (e) 제안(MI=1.1)

그림 4. 전압변조 기법과 MI에 따른 4고조파 순환전류

그림 5는 오프셋 전압제어 기법에 따른 서브모듈 커패시터 전압을 나타내고 있다. 커패시터 전압리플은 순환전류의 영향을 크게 받는다. 제안하는 기법은 3고조파 주입기법 보다 4고조파 순환전류가 작게 나타나기에 서브모듈 커패시터의 전압리플이 줄어든 것을 확인할 수 있다.



(a) 3고조파 주입 (b) 제안

그림 5. 오프셋 전압제어에 따른 서브모듈 커패시터 전압

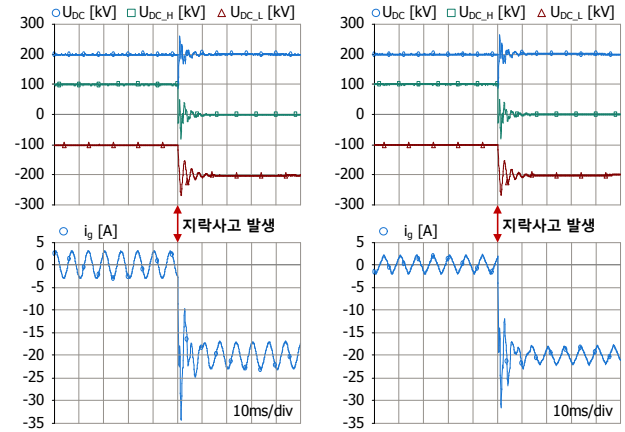
5. Zig-zag 변압기 접지 시 고조파 특성 분석

일반적으로 Zig-zag 변압기는 계통에서 중성점을 구하고 시스템의 접지를 위해 사용되며, 교류성분에 대해서는 높은 임피던스를 갖지만 직류와 영상성분에 대해 낮은 임피던스를 제공한다^[3]. 이러한 특성은 오프셋 전압제어를 적용하는 시스템에 있어 영상분의 접지전류를 유발하게 된다. 하지만 접지전류는 사고나 고장의 유무를 판단하는 주요 요소이다. 그리고 MMC HVDC 시스템에 있어 사고 및 고장의 판단은 전체 시스템의 보호를 위해 매우 중요하다.

그림 6은 그림 3과 같이 200MW MMC HVDC 시스템의 지락사고를 모의한 시뮬레이션 파형으로 각각 3고조파 주입기법과 제안하는 기법을 적용한 결과이다. 파형에서는 직류단 전압과 접지전류를 나타내고 있다. 사고시점을 기점으로 정상운전 상태에서는 접지전류에 영상분 전류, 즉 주로 3고조파 전류가 포함된 것을 확인할 수 있다. 이러한 3고조파 전류는 시스템의 AC계통 사고 및 고장의 판단을 방해하는 요소로 작용할 수 있다. 이러한 측면에서 제안하는 전압변조 기법의

경우 3고조파 주입기법에 비해 3고조파 성분에 의한 영향이 적게 나타나는 이점이 있지만, 사고판단을 위해서는 근본적으로 오프셋 전압제어 적용을 고려한 Zig-zag 변압기 접지의 적절한 설계를 필요로 한다.

사고발생 이후에는 직류단 전압의 불평형으로 인해 $U_{DC}/2$ 의 전압이 접지의 NGR(Neutral Grounding Resistor)에 인가되면서 접지전류에 직류성분의 사고전류가 흐르는 것을 확인할 수 있다.



(a) 3고조파 주입기법

(b) 제안하는 기법

그림 6. MMC HVDC 시스템의 DC 지락사고 모의

5. 결론

본 논문에서는 오프셋 전압제어에 의한 MMC의 고조파 순환전류를 수식적으로 분석하고, 200MW MMC HVDC 시스템의 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 모델을 통하여 고조파 순환전류의 특성을 확인하였다. 제안하는 가변오프셋 전압변조 기법은 MMC의 운전영역에서 효율적인 오프셋 전압 주입을 통해 기존 오프셋 전압변조 기법을 적용한 경우보다 시스템의 고조파 특성이 개선됨을 확인하였다.

그리고 오프셋 전압제어는 Zig-zag 변압기 접지를 적용한 시스템에서 접지전류에 영상분 전류를 유발하고, 시스템의 사고 및 고장 판단에 대해 혼동을 야기할 수 있음을 확인하였다. 제안된 가변오프셋 전압변조 기법을 적용하면 기존 3고조파 주입기법보다 영상분 접지전류가 감소되지만, 접지전류를 통한 사고판단의 근본적 해결책으로 볼 수 없었다. 그렇기에 오프셋 전압제어를 사용하는 MMC HVDC 시스템에 있어 적절한 Zig-zag 변압기 접지의 설계가 필요할 것으로 보인다.

참고 문헌

- [1] Kim, J.-H.; Kim, D.-H.; Han, B.-M. Offset Voltage Control Scheme for Modular Multilevel Converter Operated in Nearest Level Control. *Energies* 2017, 10, 863.
- [2] R. Li, J. E. Fletcher and B. W. Williams, "Influence of third harmonic injection on modular multilevel converter-based high-voltage direct current transmission systems," in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 11, pp. 2764-2770, 4 8 2016.
- [3] H. Wang, G. Tang, Z. He and J. Yang, "Efficient Grounding for Modular Multilevel HVDC Converters (MMC) on the AC Side," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 3, pp. 1262-1272, June 2014.