

불평형 전압 발생 시 유효전력 조절을 통한 전압형 HVDC의 DC전압 제어 방안

Control Scheme Using Active Power Regulation for DC Voltage of VSC HVDC Under Unbalanced Voltage

박 상 인* · 허 재 선* · 문 원 식* · 김 두 희* · 김 재 철*
(Sang-In Park · Jae-Sun Huh · Won-Sik Moon · Doo-Hee Kim · Jae-Chul Kim)

Abstract - Faced with unbalanced grid operation mode, the high voltage direct current (HVDC) based on voltage source converter (VSC) can be properly controlled by a dual current control scheme. For the modular multilevel converter (MMC) controlling the AC side current is able to limit the arm current which flows along the IGBT of submodule (SM) to rated current. However the limitation of the arm current results in leaving the control range of active power at MMC confined to below the rated capacity. As a result, limiting the arm current causes the problem that the DC side voltage of the HVDC can not be controlled to the reference value since MMC HVDC adjusts the DC side voltage through the active power. In this paper, we propose the algorithm adjusting the active powers of both MMCs to resolve the problem. The back-to-back MMC HVDC applying the algorithm is modeled by PSCAD/EMTDC to verify the algorithm.

Key Words : Voltage source converter (VSC), Modular multilevel converter (MMC), High voltage direct current (HVDC), Unbalanced operation, DC link voltage, Circulating current

1. 서 론

화석에너지의 고갈과 지구 온난화 등의 문제가 심각하게 대두되면서 신재생에너지에 대한 해결방안으로써 많은 연구와 실증이 진행되고 있다. 하지만 신재생에너지원이 풍부한 지역은 전력 소비지역과 멀리 떨어져 있는 경우가 많고 신재생에너지원으로부터 발전시킨 전기에너지를 기존의 송전망을 통하여 송전해야 하기 때문에 장거리 송전과 전력 조류 제어에 유리한 high voltage direct current (HVDC)에 대한 관심이 고조되고 있다 [1-2].

Voltage source convertor (VSC)기반의 HVDC는 무효전력의 제어가 가능하기 때문에 별도의 무효전력 보상설비가 요구되지 않고, pulse width modulation (PWM) 제어에 의한 빠른 제어응답과 출력 고조파 감소에 의한 필터용량 감소 등의 장점이 있다. HVDC를 통해서 송전하는 신재생에너지 발전단지의 대형화와 불규칙적인 출력변동으로 인하여 HVDC는 계통과 연계시 안정도에 기여할 수 있도록 low voltage ride through (LVRT)등의 연계기준을 만족시켜야 한다. 따라서 계통 안정도를 위한 유효전력과 무효전력의 독립적이고 능동적인 제어가 가능한 VSC 기반

HVDC에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[3],[4].

VSC 기반 HVDC의 대용량화가 진행됨에 따라서 직류측과 교류측의 정격전압 상승, 손실 감소, 출력전압 품질의 향상 등이 요구되었다. Modular multilevel converter (MMC)방식은 모듈화된 컨버터를 직렬로 연결시킨 구조로써 전력전자 소자의 전압 부하를 줄이면서 정격전압 상승 및 전압 품질 향상에 유리하고, 모듈당 on/off 횟수의 감소로 스위칭 손실을 감소시킬 수 있으며, 모듈 고장 발생 시 해당 모듈을 우회시킴으로써 내부 고장에 대한 신뢰성을 증가시킬 수 있다[5],[6]. 이런 장점들로 인해 MMC HVDC에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. MMC는 기본적으로 VSC의 제어방식을 기반으로 하지만 구성방식에 따른 차별적인 제어방식이 추가적으로 요구된다[7-9].

참고문헌 [10]은 MMC가 불평형 전압 상태에서 동작 할 때, 유효전력의 맥동성분을 제거하기 위한 역상전류 주입 시 AC 전류의 첨두값 증가로 인한 스위치 소자의 과전류 문제를 분석하고 이를 해결하기 위한 제어기법을 제시하였다. 하지만 MMC HVDC가 아닌 DC전압원이 연결된 단일 MMC가 인버터 동작을 하고 있는 경우를 모의하였다. 논문에서 제시한 제어기법은 스위칭 소자를 보호하기 위한 전류 제한으로 인하여 MMC에서 제어가능한 유효전력량이 제한되게 된다. 만약 이 방법을 MMC HVDC에 적용시킬 경우 고장 위치에 따라 유효전력 제한으로 인한 DC 전압의 상승 또는 감소가 발생하게 된다. 적절한 DC 전압이 유지되지 못할 경우 과전압으로 인한 설비 손상을 유발하거나 출력전압이 계통 연계전압을 만족 시키지 못하므로 HVDC의 안정적인 운전을 확보하기 위해서 이런 현상은 억제되어야 한다.

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,
Soongsil University, Korea.
E-mail : jckim@ssu.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University Korea .
Received : September 11, 2014; Accepted : January 21, 2015

본 논문에서는 스위치 소자의 전류용량 제한으로 인한 유효전력 제한과 DC전압 변동을 분석하고 이 현상을 막기 위한 알고리즘을 제안하였다. 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 back-to-back MMC HVDC를 구현하고 모의실험 하였다.

2. MMC HVDC

2.1 MMC의 구성 및 동작

3상 MMC는 3개의 leg로 구성되어 있고 각 leg에는 상단과 하단 arm이 존재한다. 한 arm에는 submodule (SM)들이 직렬로 연결되어 있다. SM의 개수는 SM의 종류 및 MMC AC측 출력 레벨에 의해서 결정된다. 그림 1은 3상 MMC HVDC의 구성을 나타낸다. SM외에도 arm 리액터가 존재하는데 순환전류 억제 및 고장 시 과도전류를 억제하는 역할을 한다.

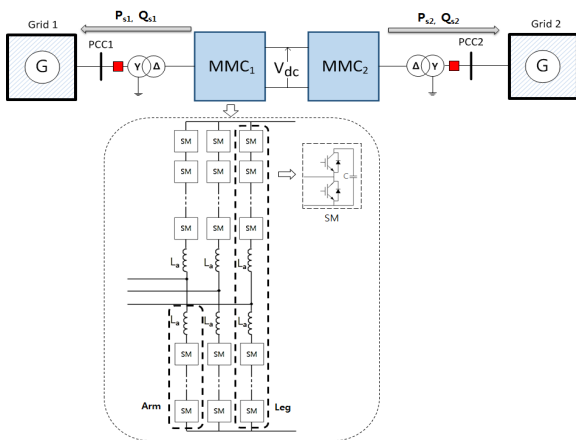


그림 1 MMC HVDC 구성도

Fig. 1 Structure of MMC HVDC

SM은 on/off 제어가 가능한 전력전자 소자와 커패시터로 구성되어 있다. SM의 구성방식이 다양하지만 일반적으로 half-bridge 방식과 full-bridge 방식으로 구분된다. 그림 1의 SM은 half-bridge 방식으로써 본 논문에서 사용하는 방식이다. SM은 초기 충전모드를 제외하고 상단 스위치와 하단 스위치의 동작에 따라서 2가지 동작모드로 구분된다. 첫 번째 모드는 상단 스위치가 켜진 상태로써 SM은 ON 동작하고 커패시터 전압을 출력하고 있다. 이 때 전류 방향에 따라서 커패시터는 충전되거나 방전된다. 두 번째 모드는 하단 스위치가 켜진 상태로써 SM은 OFF 동작하고 전류 방향에 상관없이 SM은 Bypass된다[5].

2.2 MMC 제어

2.2.1 MMC의 전류제어

SM들의 ON/OFF 주파수가 계통 주파수보다 매우 높고, arm

에 SM들이 매우 많다고 가정하면 MMC를 그림 2와 같이 등가시키는 것이 가능하다. 상단과 하단 arm에 흐르는 전류의 차는 항상 AC 선 전류와 같으며, 이때 각 전류에는 선 전류 이외에 상·하단 arm 전압 차이에 의한 차전류(difference current)가 존재한다. 따라서 MMC의 전류 관계를 식 (1),(2),(3),(4)와 같이 나타낼 수 있다[9].

차전류 i_{diff-j} 는 AC로 출력되는 선 전류에는 영향을 미치지 않고 arm내부에서 순환하는 전류로써 직류 전류와 2차 고조파 역상 전류로 이루어져 있다. 이 순환전류는 arm전류의 실효치를 높이고 손실을 증가시키기 때문에 억제되어야 할 전류성분이다[8].

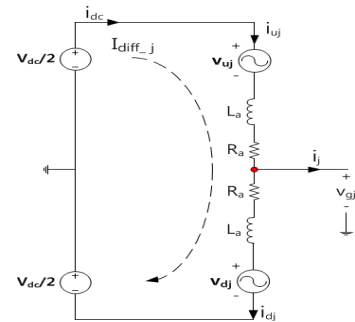


그림 2 MMC 단상 등가회로

Fig. 2 A single equivalent circuit of MMC

$$i_j = i_{u_j} - i_{d_j} \quad (j = a, b, c) \quad (1)$$

$$i_{u_j} = \frac{i_j}{2} + i_{diff-j} \quad (2)$$

$$i_{d_j} = -\frac{i_j}{2} + i_{diff-j} \quad (3)$$

$$i_{diff-j} = (i_{u_j} + i_{d_j})/2 \quad (4)$$

여기서, i_j : AC전류 [A]

i_{u_j} : 상단 arm전류 [A]

i_{d_j} : 하단 arm전류 [A]

i_{diff-j} : 차전류 [A]

MMC의 AC 전류 i_j 는 식 (5)에 나타난 내부 교류전압(inner alternating voltage) v_j 에 의해서 제어된다. 내부 차전류 i_{diff-j} 는 식 (6)에 나타난 차전압(difference voltage) v_{diff-j} 에 의해서 제어된다[11].

$$v_j = \frac{v_{d_j} - v_{u_j}}{2} \quad (5)$$

$$v_{diff-j} = \frac{V_{dc}}{2} - \frac{(v_{u_j} + v_{d_j})}{2} \quad (6)$$

$$v_{u_j} = \frac{v_{dc}}{2} - v_j - v_{diff-j} \quad (7)$$

$$v_{d_j} = \frac{v_{dc}}{2} + v_j - v_{diff-j} \quad (8)$$

여기서, v_{u_j} : 상단 arm전압 [V]
 v_{d_j} : 하단 arm전압 [V]
 v_j : 내부 교류전압(inner alternating voltage) [V]
 v_{diff-j} : 차전압(difference voltage) [V]

i_j 와 i_{diff-j} 를 제어하기 위해서는 v_j 와 v_{diff-j} 를 적절하게 시스템에 입력해야 한다. 하지만 MMC는 SM들의 ON/OFF를 통해서 arm전압을 조절하는 것이 기본동작이다. 따라서 제어를 위해 v_j , v_{diff-j} 를 사용하여 arm전압을 정리해야 한다. 그 정리는 식 (5)를 v_{u_j} 와 v_{d_j} 에 관하여 전개한 후 식 (6)에 대입함으로써 얻을 수 있고 결과는 식 (7), (8)과 같다. 이 식을 통해서 arm 전압에 대한 최종적인 지령값을 계산할 수 있다[8].

그림 3은 MMC 전류제어기의 전체 구성을 나타낸다. circulating current suppressing controller (CCSC)는 차전류 억제 제어를 나타내고, 지령 값으로 0을 입력받으며 제어기의 출력은 $v_{diff-j,ref}$ 이다[10]. 나머지 전류 제어기 부분은 AC 선 전류를 제어하는 부분이다. 제어기는 적절한 전류 지령치를 입력받아 $v_{j,ref}$ 를 출력한다. 각 제어기에서 출력된 전압 지령치는 식 (7), (8)을 통해서 상단 arm과 하단 arm 전압 지령치가 계산된다.

arm전압 지령치를 만족시키기 위한 SM들의 ON/OFF 결정은 다양한 PWM 방식과 SM 전압균형 알고리즘을 통해서 결정된다. 본 논문에서는 참고문헌 [5]에서 제시한 방식을 사용하였다.

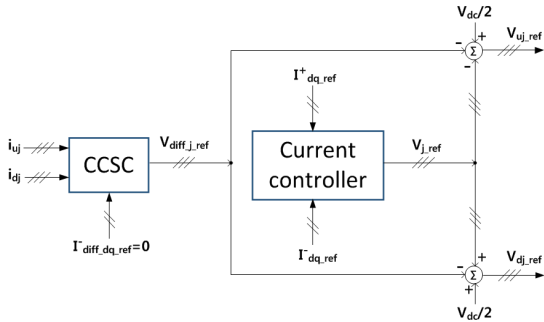


그림 3 MMC의 전류제어기 구성도
 Fig. 3 Current controller structure of MMC

2.2.2 계통 연계형 MMC의 AC전류 지령치 설정

MMC는 AC측 선 전류를 제어할 수 있는 특성을 이용해서 계통과 연계 시 순시전력을 제어할 수 있다. 그림 4는 계통과 연계된 3상 MMC 시스템을 나타낸다. 그림과 같이 전압, 전류, 전력 방향이 정의 되어있을 때 순시전력은 식 (9),(10)과 같이 나타낼 수 있다.

P_0 와 Q_0 는 유효전력과 무효전력의 직류성분을 나타낸다. 또한 $P_{s2}, P_{c2}, Q_{s2}, Q_{c2}$ 로 표현된 성분들은 계통 전압이 불평형 상태일 때 계통 주파수의 2차 고조파 맥동으로 발생하는 성분이다. MMC는 AC전류를 d축 정상, d축 역상, q축 정상, q축 역상 성분으로 분리시켜 각각 독립적으로 제어할 수 있기 때문에 전력성분

중 네 가지를 선택하여 제어할 수 있다. 일반적으로 계통과 연계되는 MMC는 P_0, Q_0, P_{s2}, P_{c2} 를 제어하도록 운영된다. 이 값들을 전압과 전류에 관한 행렬식으로 표현하면 식 (11)과 같다[7].

식 (11)을 통해서 MMC가 계통과 연계되어 있을 때 전력 지령치에 대한 전류 지령값을 계산할 수 있다. 계산된 전류 지령값 I_{dq-ref}^+ 는 그림 3의 전류 제어기로 입력된다.

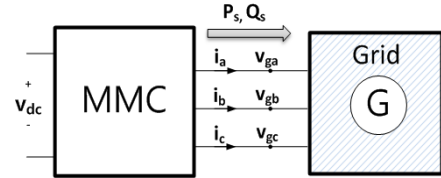


그림 4 계통과 연계된 3상 MMC 시스템
 Fig. 4 Three phase MMC system linked to grid

$$P_s = P_0 + P_{s2}\sin 2\omega_0 t + P_{c2}\cos 2\omega_0 t \tag{9}$$

$$Q_s = Q_0 + Q_{s2}\sin 2\omega_0 t + Q_{c2}\cos 2\omega_0 t \tag{10}$$

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \\ P_{s2} \\ P_{c2} \end{bmatrix} = 1.5 \begin{bmatrix} V_{gd}^+ & V_{gq}^+ & V_{gd}^- & V_{gq}^- \\ V_{gq}^+ - V_{gd}^+ & V_{gq}^- - V_{gd}^- & V_{gd}^+ & V_{gq}^+ \\ V_{gq}^- - V_{gd}^- & -V_{gq}^+ & V_{gd}^+ & V_{gq}^+ \\ V_{gd}^- & V_{gq}^- & V_{gd}^+ & V_{gq}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d^+ \\ I_q^+ \\ I_d^- \\ I_q^- \end{bmatrix} \tag{11}$$

여기서, V_{gdq}^+ : 계통전압의 정상 d-q 좌표계 값 [V]
 I_{dq}^+ : AC전류의 정상 d-q 좌표계 값 [A]
 V_{gdq}^- : 계통전압의 역상 d-q 좌표계 값 [V]
 I_{dq}^- : AC전류의 역상 d-q 좌표계 값 [A]

2.3 MMC HVDC의 DC 전압제어

MMC의 안정적인 운영을 위해서 DC 전압을 일정하게 유지하는 것이 필수적이다. 그림 5는 MMC HVDC의 DC 측 등가회로를 나타낸다. 여기서 C_{eq} 는 등가커패시터이고 SM의 커패시터와 MMC 출력 레벨에 의해서 계산된다[10].

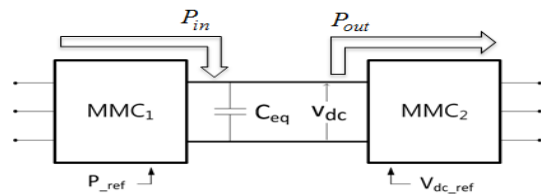


그림 5 MMC HVDC의 DC측 회로 개념도
 Fig. 5 Schematic diagram of the DC side of MMC HVDC

$$\frac{1}{2} C_{eq} \frac{dv_{dc}^2}{dt} = P_{in} - P_{out} \tag{12}$$

여기서, C_{eq} : MMC HVDC 등가 커패시터 [F]

v_{dc} : DC 전압 [V]
 P_{in} : DC 측으로 입력되는 유효전력 [W]
 P_{out} : DC 측에서 출력되는 유효전력 [W]

DC 전압과 입, 출력하는 유효전력의 관계는 식 (12)로 나타낼 수 있다. 식을 통해서 알 수 있듯이 DC단으로 입, 출력 하는 유효전력의 차가 발생 할 경우 DC전압이 증가하거나 감소하게 된다. 따라서 HVDC의 두 MMC 중에서 한 MMC는 전력흐름의 차이를 이용하여 DC전압을 제어하는 역할을 한다. 제어기는 식 (12)의 전달함수를 통해서 설계된다[12].

3. MMC HVDC의 최대 유효전력 및 DC 전압 유지방안

MMC를 포함한 VSC는 전류제어를 기반으로 하기 때문에 불평형 전압 상태에서도 arm에 흐르는 전류를 제한하는 것이 가능하다. CCSC에 의해서 순환전류가 억제되고 있다고 가정할 때 arm 전류는 식 (13), (14)로 나타낼 수 있다.

$$i_{uj} = \frac{i_{dc}}{3} + \frac{i_j}{2} \quad (13)$$

$$i_{dj} = \frac{i_{dc}}{3} - \frac{i_j}{2} \quad (14)$$

arm 전류 최대 허용치를 SM의 IGBT 허용전류 $i_{IGBT,peak}$ 로 설정하고 MMC AC측 전류를 기준으로 표현하면 식 (15), (16)으로 나타낼 수 있다. 이 때 AC 전류의 첨두치는 식 (17)과 같이 제한된다[10].

$$i_j = 2(i_{IGBT,peak} - \frac{i_{dc}}{3}) \quad (15)$$

$$i_j = -2(i_{IGBT,peak} - \frac{i_{dc}}{3}) \quad (16)$$

$$|i_{j,peak}| \leq 2(i_{IGBT,peak} - \frac{i_{dc}}{3}) \quad (17)$$

MMC에서 AC전류는 정상, 역상 그리고 d-q 성분으로 분리되어 제어되기 때문에 AC전류의 최대값은 식 (18)과 같이 네 가지 성분으로 표현 될 수 있다.

$$|i_{j,peak}| = |i_j^+| + |i_j^-| = \sqrt{(I_d^+)^2 + (I_q^+)^2} + \sqrt{(I_d^-)^2 + (I_q^-)^2} \quad (18)$$

전류의 지령치는 식 (11)을 통해서 정해진다고 앞서 설명하였다. 불평형 전압상태에서 유효전력의 맥동을 억제시키기 위해 역상전류 지령치가 우선적으로 정해진다. 동기좌표계를 q축 전압 (V_{gq}^+)이 0 이 되도록 동기 시킬 경우 역상전류 지령치는 식 (19), (20)과 같다.

$$I_{d,ref} = (V_{gd}^- I_d^+ + V_{gq}^- I_q^+) \frac{-1}{V_{gd}^+} \quad (19)$$

$$I_{q,ref} = (V_{gd}^- I_q^+ - V_{gq}^- I_d^+) \frac{1}{V_{gd}^+} \quad (20)$$

역상전류 성분을 제외한 정상전류 지령치는 유효전력과 무효전력에 의해서 결정되고 식 (21), (22)와 같다.

$$I_{d,ref}^+ = \frac{1}{V_{gd}^+} \left(\frac{2P_{0,ref}}{3} - V_{gd}^- I_{d,ref}^- - V_{gq}^- I_{q,ref}^- \right) \quad (21)$$

$$I_{q,ref}^+ = \frac{-1}{V_{gd}^+} \left(\frac{2Q_{0,ref}}{3} + V_{gd}^- I_{q,ref}^- - V_{gq}^- I_{d,ref}^- \right) \quad (22)$$

앞서 언급했듯이 풍력단지등의 대용량 분산전원이 HVDC를 통하여 계통과 연계되는 경우가 증가함에 따라 계통전압 이상 시 HVDC는 LVRT등의 연계기준을 만족시키기 위하여 무효전력을 의무적으로 공급해야 한다. 따라서 정상전류 성분 중에서 무효전력과 관련된 q축 전류가 우선적으로 결정된다. 이 때 허용전류를 고려한 d축 전류 최대값은 식 (23)으로 나타낼 수 있다. 이 $I_{d,max}^+$ 에 의해서 유효전력과 관련된 $I_{d,ref}^+$ 는 제한된다.

$$I_{d,max}^+ = \sqrt{(i_{j,peak} - I_{q,ref}^-)^2 - (I_{q,ref}^-)^2} \quad (23)$$

$I_{d,ref}^+$ 의 제한은 MMC의 유효전력 제어범위를 제한시킨다. 이 때 유효전력 최대값은 식 (23)을 식 (21)에 대입함으로써 얻을 수 있고, 결과는 식 (24)와 같다.

$$P_{0,max} = \frac{3}{2} (I_{d,max}^+ V_{gd}^+ + V_{gd}^- I_{d,ref}^- + V_{gq}^- I_{q,ref}^-) \quad (24)$$

사고가 발생하는 위치에 따라 유효전력 제한은 DC전압을 지령치대로 제어할 수 없는 현상을 발생시킨다.

그림 5와 같은 MMC HVDC시스템이 있다고 가정할 때, DC전압을 제어하고 있는 MMC_2 측에서 사고가 발생하는 경우 제어할 수 있는 최대 유효전력은 식 (24)를 통해서 제한된다. 이때 MMC_1 에서는 사고 전과 동일한 유효전력을 DC측으로 입력하거나 출력하는 상태를 유지한다. 이 값이 MMC_2 의 최대 유효전력량의 크기보다 클 경우 유효전력 흐름의 불균형으로 인해서 DC전압은 지령치를 유지하지 못하게 된다. DC 전압이 적절히 유지되지 못할 경우 계통과 연계시키기 위한 출력전압을 만족시키지 못하거나 DC측에 과도한 전압을 발생시켜 설비에 손상을 유발시킬 수 있다[12].

사고발생시 DC전압을 유지시키기 위해서는 DC전압을 제어하는 MMC_2 뿐만 아니라 MMC_1 의 협조적인 동작이 요구된다. 입, 출력 유효전력 불균형으로 인한 DC전압 유지가 불가능할 때 MMC_2 에서 제어할 수 있는 최대전력량을 고려하여 MMC_1 의 유효전력 지령치를 조절해야한다.

그림 6은 본 논문에서 제안하는 DC전압 유지 알고리즘을 나타낸다. DC전압을 제어하고 있는 MMC_2 측의 최대 AC전류 $i_{j,peak}$ 와 최대 유효전력 $P_{s2,max}$ 를 식 (17), (24)를 이용하여 계산한다.

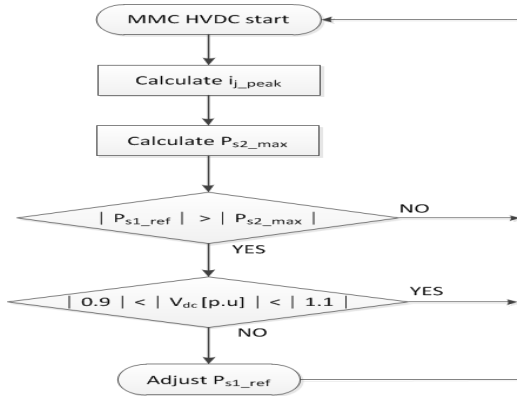


그림 6 유효전력 조절을 통한 DC전압 유지 알고리즘
 Fig. 6 Algorithm regulating active power to obstruct the variation of DC voltage

$|P_{s2_max}|$ 가 MMC_1 의 지령치 $|P_{s1_ref}|$ 보다 작고 DC전압이 정해진 제한값을 벗어날 경우 $|P_{s1_ref}|$ 는 $|P_{s2_max}|$ 로 조절된다. 이 과정은 사고가 제거된 후에도 DC 전압이 정해진 제한 값을 만족시킬 때까지 유지된다.

표 1 시스템 파라미터

Table 1 System parameters

구분	값
MMC HVDC 정격용량	25 [MVA]
계통 전압	22.9 [kV]
계통 주파수	60 [Hz]
변압기 전압비	22.9 kV/11 kV
변압기 정격용량	25 [MVA]
변압기 누설 리액턴스	1 [%]
arm 인덕턴스(L_a)	2.5 [mH]
arm 저항(R_a)	0.03 [ohm]
DC측 정격전압	20 [kV]
MMC 스위치 주파수	1800 [Hz]
MMC 전압 Level	11 Level
SM 커패시턴스	9100 [μ F]
IGBT 허용전류	1.345 [kA]

4. 시뮬레이션

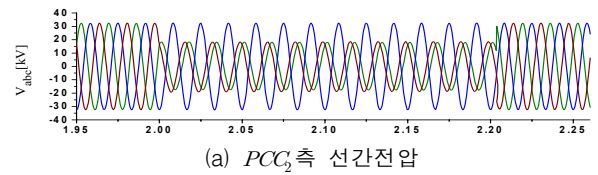
알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 정격용량 25[MVA]인 11 Level MMC HVDC 시스템을 과도해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 구현하고 본 논문에서 제시하 DC 전압 알고리즘을 적용하여 모의실험을 실시하였다.

SM의 IGBT 허용전류 i_{IGBT_peak} 는 HVDC용량 25[MVA]를 고려하고 식 (13)을 통해서 최대 1.345[kA]로 제한했다. 시스템의 구성도는 그림 1과 같으며 참고문헌 [13]에 제시된 데이터를 활용하여 시스템 파라미터를 선정하였다.

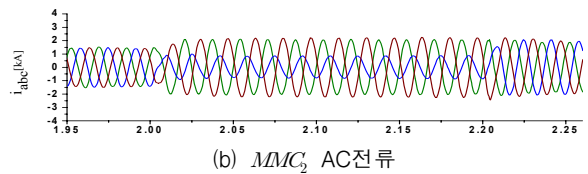
DC 전압은 MMC_2 측에서 제어하고 있는 상태이다. 불평형 전압은 PCC_2 에서 단상지락 사고로 인하여 200[ms]동안 발생한다. 유효전력은 P_{s2} 기준으로 20[MW]로 운전되도록 지령하였고, 사고 발생 시 무효전력 5[Mvar]를 공급하도록 설정하였다.

그림 7은 알고리즘을 적용하지 않았을 때의 모의실험 결과를 나타낸다. 그림 (a)는 PCC_2 의 선간전압을 보여준다. 그림 (b),(c),(d)는 MMC_2 측의 AC전류와, arm전류, 출력 전력을 각각 나타낸다. 그림 (e)는 MMC_1 의 출력전력을 나타내며, 그림 (f)는 MMC HVDC의 DC전압을 나타내고, 그림 (g)는 MMC_2 a상의 상단 SM전압을 나타낸다.

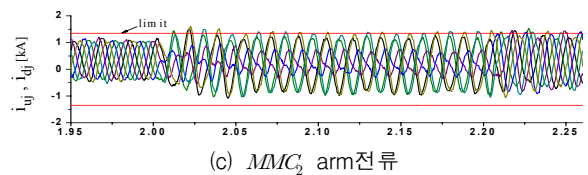
2[s]에서 a상 지락사고가 발생할 때 유효전력 맥동을 억제하기 위한 역상전류가 제어된다. 그 결과 사고 측인 MMC_2 의 출력 유효전력에 맥동이 제거 되지만 arm전류의 제한으로 인해서 사고 전과 비교하여 유효전력이 감소되는 것을 그림 (c),(d)를 통해서 확인할 수 있다. 사고 측인 MMC_2 의 출력 변화에 반하여 MMC_1 는 사고전과 동일한 유효전력을 지속적으로 공급하고 있다. MMC_1 에 의한 유효전력 입력과 MMC_2 에 의한 출력 유효전력의 차이로 인해서 DC전압은 지령치를 벗어나 상승하게 된다. 다수의 SM전압들은 전압균형 알고리즘을 통해서 총전과 방전이 고르게 제어되지만 DC측의 전압이 상승함에 따라 평균값이 상승한다.



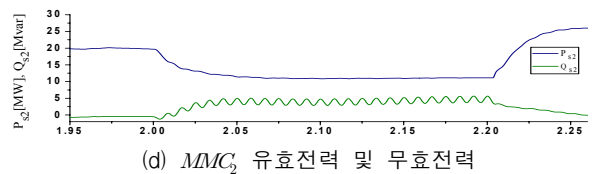
(a) PCC_2 측 선간전압



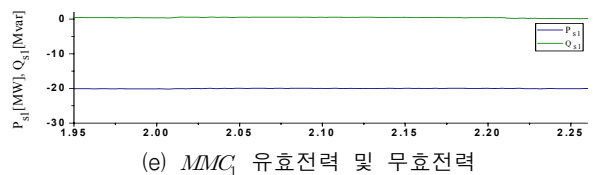
(b) MMC_2 AC전류



(c) MMC_2 arm전류



(d) MMC_2 유효전력 및 무효전력



(e) MMC_1 유효전력 및 무효전력

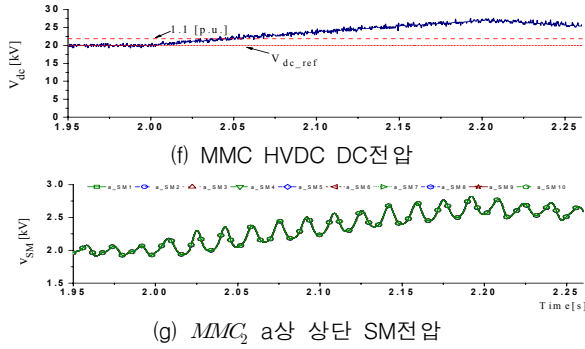


그림 7 DC전압 제어 알고리즘 미 적용시 불평형 전압에 대한 MMC HVDC 응답

Fig. 7 MMC HVDC response under unbalanced voltage without algorithm of DC voltage control

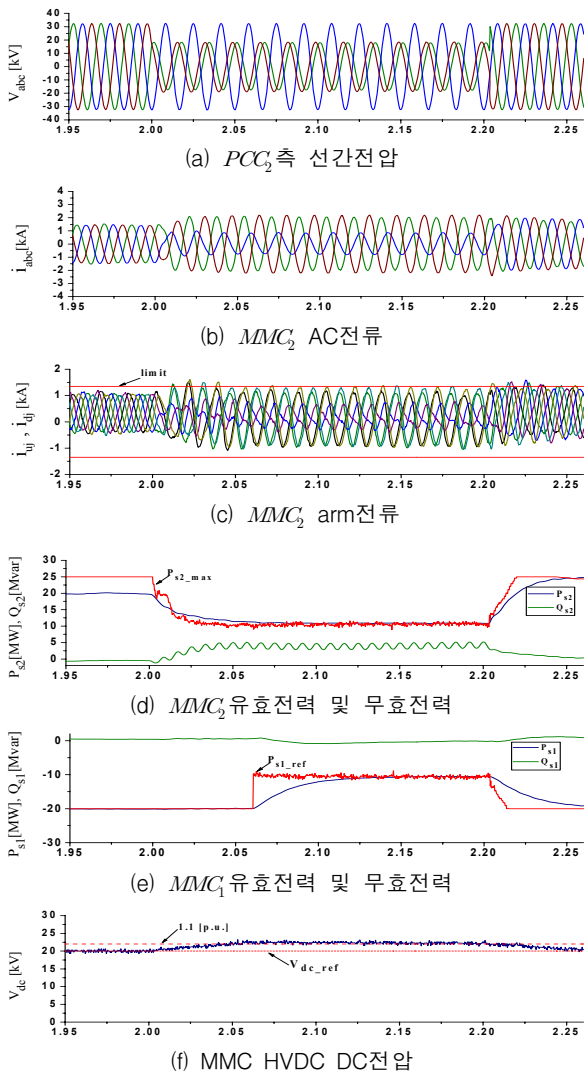


그림 8 DC전압 제어 알고리즘 적용시 불평형 전압에 대한 MMC HVDC 응답

Fig. 8 MMC HVDC response under unbalanced voltage with algorithm of DC voltage control

그림 8은 알고리즘을 적용한 모의실험 결과를 나타낸다. 그림 7과 마찬가지로 2[s]에서 PCC_2 측 a상 지락사고로 인한 불평형 전압이 발생한다. 역상분 전류가 제어되고 유효전력의 맥동이 제거된다. 또한 스위치 소자의 허용전류를 고려한 제어가 이루어지기 때문에 arm전류는 허용치 이하로 제어된다. arm전류 제한으로 인해서 사고측의 최대 유효전력 P_{s2} 가 억제되어 MMC HVDC에서 출력되는 유효전력은 감소하는 것을 그림 (d)를 통해서 확인할 수 있다. 이 때 DC전압이 상승하는 것을 억제하기 위해서 알고리즘을 통한 $|P_{s2_max}|$ 가 계산되고 DC전압이 제한치를 초과했을 때 MMC_1 이 $|P_{s1_ref}|$ 를 조절하는 협조운전을 통하여 DC전압이 제한치를 초과하지 않는 것을 그림 (e),(f)를 통해서 확인할 수 있다. DC전압이 제한치 이하로 제어됨에 따라서 SM전압 또한 적절한 값을 유지하는 것을 그림 (g)를 통해서 확인할 수 있다. 사고가 제거된 2.2[s] 이후부터는 DC전압을 지령치인 20[kV]로 감소시키기 위하여 MMC_2 의 DC전압 제어기는 P_{s2} 를 조절한다.

5. 결 론

MMC 기반인 전압형 HVDC는 연계된 계통에서 불평형 전압이 발생 했을 때, 불평형 제어기법을 이용하여 정상적인 동작을 한다. 또한 AC전류와 arm전류 제어가 가능한 MMC의 특성상 스위치 소자에 흐르는 전류를 허용전류 이하로 제한할 수 있다. 하지만 전류 제한에 따른 유효전력 제어범위가 정격전력 이하로 한정되고, 이런 유효전력 제한은 두 MMC의 입출력 유효전력의 차이를 이용해서 일정한 DC전압을 유지하는 MMC HVDC시스템이 DC전압을 지령값으로 제어하지 못하는 상황을 발생시킨다.

본 논문에서는 불평형 사고 발생시 arm전류 제한에 의해서 MMC가 제어할 수 있는 최대 유효전력이 감소하는 것을 수식적으로 나타내고 DC전압이 제어되지 못하는 원인을 분석하였다. 또한 유효전력 제어가 억제된 상태에서 DC전압 제어가 정상적으로 이루어 질 수 있도록 HVDC의 두 MMC가 상호 협조적으로 유효전력을 제어하는 알고리즘을 제안하였다. 알고리즘의 검증을 위해서 MMC HVDC 시스템을 PSCAD/EMTDC를 사용하여 구현하고 알고리즘을 적용시킨 모의실험을 통해서 알고리즘의 타당성을 입증하였다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20123010020160)

References

[1] Agelidis, Vassilios G., Georgios D. Demetriades, and Nikolas Flourentzou, "Recent advances in high-voltage direct-current power transmission systems", IEEE International Conference on Industrial Technology, pp. 206-213, 2006.

[2] Bahrman, Michael P, Brian K. Johnson, "The ABCs of HVDC transmission technologies", IEEE Power and Energy Magazine, pp. 32-44, 2007.

[3] Flourentzou, Nikolas, Vassilios G. Agelidis, and Georgios D. Demetriades, "VSC-based HVDC power transmission systems: An overview", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24, No. 3, pp. 592-602, Mar. 2009.

[4] Xu, Zheng, and Hairong Chen, "Review and Applications of VSC HVDC" High Voltage Engineering, Vol. 30, No. 1, pp. 1-10, 2007.

[5] Saeedifard, Maryam, and Reza Iravani, "Dynamic performance of a modular multilevel back-to-back HVDC system", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 4, pp. 2903-2914, Oct. 2010.

[6] Saeedifard, Maryam, Reza Iravani, and Josep Pou, "Analysis and control of DC-capacitor-voltage-drift phenomenon of a passive front-end five-level converter", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 6, pp. 3255-3266, Dec. 2007.

[7] Guan, Minyuan, and Zheng Xu. "Modeling and control of a modular multilevel converter-based HVDC system under unbalanced grid conditions", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27, No. 12. pp. 4858-4867, Dec. 2012.

[8] Tu, Qingrui, Zheng Xu, and Lie Xu, "Reduced switching -frequency modulation and circulating current suppression for modular multilevel converters", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, No. 3, pp. 2009-2017, Jul. 2011.

[9] Antonopoulos, Antonios, Lennart Angquist, and H-P. Nee, "On dynamics and voltage control of the modular multilevel converter", IEEE Power Electronics and Applications(EPE), 2009.

[10] Ji-Woo Moon, et al, "Control of HVDC-MMC Considering the Switching Device's Current Capacity

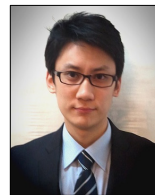
and Circulating Current under Unbalanced Voltage Conditions", The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics Vol. 18, No. 3, pp. 270-278, June. 2013.

[11] Konstantinou, Georgios S, Mihai Ciobotaru, and Vassilios G. Agelidis, "Analysis of multi-carrier PWM methods for back -to-back HVDC systems based on modular multilevel converters", IEEE Industrial Electronics Society Conference(IECON), pp. 4391-4396, Nov. 2011.

[12] Yazdani, Amirnaser, Reza Iravani, "Voltage-sourced converters in power systems", John Wiley & Sons, 2010.

[13] Jung-Won Hong, et al, "Switching-Level Operation Analysis of MMC-based Back-to-Back Converter for HVDC Application", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 62, No. 9, pp. 1240-1248, Sep. 2013.

저 자 소 개



박 상 인(Sang-In Park)

1986년 9월 1일생. 2012년 숭실대학교 전기공학부 졸업(학사). 2014년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사).
Tel : 02-817-7966
E-mail : psi901@ssu.ac.kr



허 재 선(Jae-Sun Huh)

1985년 1월 23일생. 2009년 숭실대학교 전기공학부 졸업(학사). 2011년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학부 박사과정.
Tel : 02-817-7966
E-mail : jasonh@ssu.ac.kr



문 원 식(Won-Sik Moon)

1982년 2월 15일생. 2009년 숭실대학교 전기공학부 졸업(학사). 2011년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학부 박사과정.
Tel : 02-824-2416
E-mail : chriswmoon@ssu.ac.kr



김 두 희(Doo-Hee Kim)

1986년 10월 28일생. 2014년 송실대학교 전기공학부 졸업(학사). 현재 동 대학원 전기공학부 석사과정.

Tel : 02-824-2416

E-mail : pranagan@hotmail.com



김 재 철(Jae-Chul Kim)

1955년 7월 12일생. 1979년 송실대 전기공학과 졸업(학사). 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 송실대학교 전기공학부 교수.

Tel: 02-817-0647

Fax: 02-817-0780

E-mail : jckim@ssu.ac.kr