

# VSC MMC HVDC System의 절연설계

김현민\*, 김희수, 조해송, 김찬기  
한국전력공사 전력연구원

## Insulation Coordination of VSC HVDC based on MMC topology

Hyun-Min Kim\*, Hui-Su Kim, Haesong Cho, Chan-ki Kim  
Korea Electric Power Research Institute

### ABSTRACT

본 논문은 MMC 기반의 전압형 HVDC System의 절연설계에 대한 내용을 담고 있다. 절연설계 시 필요한 Surge Arrester 전압결정, 이격거리, 연면거리에 대해 DC측과 AC측을 비교하고 그에 따른 계산 방법에 관한 내용을 기술한다.

### 1. 서론

VSC HVDC 컨버터 스테이션의 절연설계 목적은 다음과 같이 두 가지 목적을 만족하여야 한다.

- ▶ 시스템에 임펄스 과전압이 발생할 때 주요 설비(변압기, 밸브 등)가 손상되지 않도록 적절히 보호하는 것.
- ▶ BIL(Basic Insulation Level), BSL(Basic Switching impulse insulation Level) 및 이격거리, 연면거리와 같은 파라미터를 최적화하여 신뢰할 수 있고 경제적으로 실행 가능한 컨버터 스테이션 설계를 제공하는 것.

또한, 본 논문은 시스템의 절연 설계 시 최적화된 값을 구하기 위해 외국 선진사의 표준화된 설계방식을 도입하였다. 본 논문은 국제 표준에 준하여 설계방식을 제시한다.

### 2. 본론

#### 2.1 Surge Arrester 전압결정

Surge Arrester 전압을 결정하기에 앞서 “전압결정계수 (Voltage Determination Factor)”를 고려해야 한다. 전압결정계수는  $I_{mA}$  방전 전류를 허용하는 Surge Arrester 전압인  $V_{1mA}$ 와 밸브의 최대 반복 동작 전압인  $V_{rmp}$ 의 비율을 말하며 다음 방정식으로 정의된다.

$$S = \frac{V_{rmp}}{V_{1mA}} \quad (1)$$

또한, 그림 1(b)에서 보여주는 Surge Arrester 수명 시험 결과를 반영하며, Surge Arrester 수명은 동작 온도에 따라 달라진다. 예를 들어서, 주변 환경 온도 60°C에서 ZnO 피뢰기의 수명이 10년 이상 사용하려는 경우에는 “전압결정계수”  $S$ 는 1.0 미만이어야 한다.

그림 2는 VSC HVDC 컨버터 스테이션의 Surge Arrester 배치를 보여 주며 다음 표와 같이 개폐충격(Switching impulse) 및 뇌충격(Lightning impulse) 시 측정오차나 수명저하를 고려한 안전 여유를 두어야 한다.

표 1 개폐충격, 뇌충격의 안전 여유

	밸브	다른기기(%)
개폐충격(Switching impulse) 안전여유	25	5
뇌충격(Lightning impulse) 안전여유	25	25

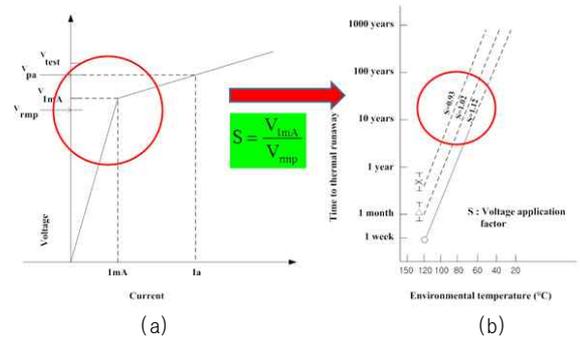


그림 1 Surge Arrester 전압결정 방법

#### ▶과전압:

- 개폐 & Lightning
- AC & DC
- SA에 의해 제한됨.

#### ▶Surge Arrester:

- 중요 구성요소가 직접 보호
- 기기에 가까움
- 다른 유형 고장에 의해 결정

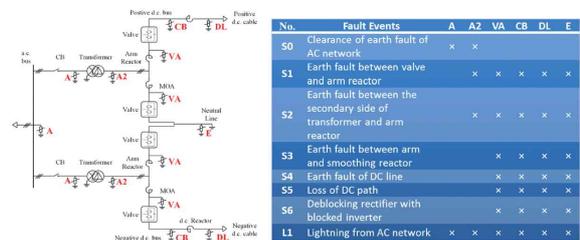


그림 2 VSC HVDC 스테이션의 Surge Arrester 배치

#### 2.2 공기 이격거리(Air Clearance)

▶ 대기 보정계수( $E_f$ )는 다음과 같이 구해진다.

$$E_f = K_d * K_h \quad (2)$$

$K_d$  = 공기 밀도 보정계수,  $K_h$  = 습도 보정계수  
여기서, 공기 밀도 보정계수는 다음과 같다.

$$K_d = \left[ \frac{b}{b_0} \cdot \frac{273+t_0}{273+t} \right]^m \quad (3)$$

여기서,  $t_0 = 20^\circ\text{C}$  (표준 기준 온도)  
 $b_0 = 1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  (표준 기준 압력)  
 $T =$  최대 주변 온도,  $b =$  정상 기압,  $m = 1$

▶DC 측: DC 측 이격거리는 Electra 29, IEC60071, IEC60060에 기술된 기법에 따라 계산되며, Electra 96의 권장 사항을 따라, 이격거리 계산을 위한 섬락(Flashover)을 견딜 확률은 다음과 같이 고려된다.

표 2 Flashover를 견딜 확률

	확률(%)	표준 편차(SD)
DC switchyard	97.7	2
Valve hall	99.7	3

DC 이격거리는 50% 섬락전압 및 전극 구성 계수를 사용하여 계산된다. 상-대지 이격거리인지 상간 이격거리인지(서로 다른 전위에서 두 컨덕터 사이의 이격거리)에 따라 두 가지 다른 계산이 적용된다.

▶50% 섬락전압: 지정된 확률을 달성하기 위해 해당 50% 섬락전압  $U_{50}$ 이 주어짐. ( $\sigma$ 는 과전압 분포의 기존 편차 단위 값)

$$U_{50} = \frac{U_z}{1 - \sigma Z} \quad (4)$$

개폐충격 시  $\sigma = 0.06$ , 뇌충격 시  $\sigma = 0.03$ ,  $Z =$  차체 복원 절연체의 방전 확률 함수의 기존 편차,  $UZ =$  필수 내전압 강도

▶상-대지 간 공기 이격거리 계산: 상-대지 이격거리는 스위칭 및 라이트닝 과도현상 모두에 의해 영향을 받는다. 스위칭 및 라이트닝 과도현상으로 인한 이격거리는 다른 방법으로 계산되며, 더 큰 값을 선택한다. 과도 스위칭의 경우 이격거리는 다음과 같이 계산된다.

$$d_{sw} = \left[ \frac{U_{505} * 1}{E_f * k * 500} \right]^{1.667} \quad (5)$$

$K =$  Electra29 및 IEC60071-2에 기초한 전극 구성 계수  
 $E_f =$  대기 보정계수,  $U_{505} =$  개폐충격용 섬락전압 50%  
 라이트닝 과도기의 경우 다음과 같이 지정된다.

$$d_{LW} = \frac{U_{50L} * 1}{E_f * 575}, \quad (U_{50L} = 50\% \text{ Lightning Impluse}) \quad (6)$$

▶상간 공기 이격거리 계산: 상간 이격거리는 Electra29에서 구한 그림 3의 곡선 2에 보정된  $U_{50s}$ (즉,  $U_{50s}/E_f$ )을 참조하여 계산한다.

### 2.3 연면거리(Creepage Distance)

▶DC 측: MCOV를 이용하여 다음과 같이 결정한다.

표 3 DC측 연면거리

설명	정류기/인버터(mm/kV)
DC indoors (벨브 홀)	20
DC+AC outdoors	35
DC 부상(outdoor 부분)	35

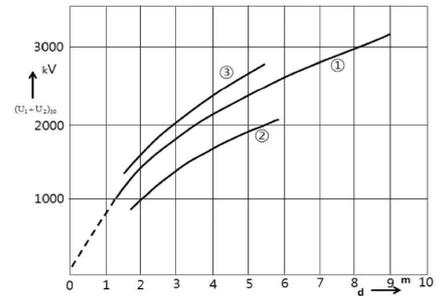


그림 3 위상 간 50% 섬락전압 대 이격거리  $d$   
 $(\alpha = U_{-1}/(U_{-1} + U_{-2}) = 0.5, \Delta t = 0)$ , 1: 링 전극 구성,  
 2: 로드 플레이트 전극 구성(양극 로드-음극 플레이트),  
 3: 로드 플레이트 전극 구성(음극 로드-양극 플레이트)

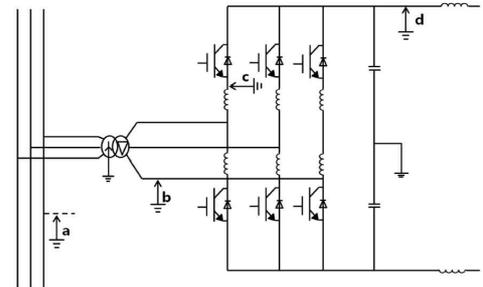


그림 4 절연 레벨 위치

▶AC 측: 전압의 최대 RMS값을 이용하여 다음과 같이 구한다.

표 4 AC 측 연면거리

설명	정류기	인버터(mm/kV)
AC	20	25

▶지름 보정계수

절연체 또는 부싱의 직경을 고려하여 계산된 최소 연면거리에 보정계수( $K_{di}$ )를 적용해야 한다. 보정계수는 다음과 같다.

$$K_{di} = \begin{cases} \text{평균 직경 } D_m < 300\text{mm의 경우 } 1 \\ 300 < D_m < 500\text{mm의 경우 } 1.1 \\ D_m > 500\text{mm의 경우 } 1.2 \end{cases}$$

커패시터를 제외하고 수평 위치( $\pm 30^\circ$ )로 부착된 모든 야외 부싱의 경우 모든 연면거리를 20% 증가시켜야 한다.

### 3. 결론

수식을 통해 실제적인 MMC기반 전압형 HVDC 시스템의 절연설계가 수행되었다. 그중에서도 Surge Arrester의 전압결정, 이격거리, 연면거리에 대해 DC측과 AC측을 비교하였고 절연설계 시 고려해야 할 요소에 대해 검토하였다. 본 논문의 수식에 적용된 값은 실제 사용되어지는 값을 반영한 것으로, IEC 규격에서 제시하는 값보다 보수적으로 크다. 이는 현실성이 반영된 결과이기 때문이며 보다 실제적인 값을 수식에 대입함으로써 기존의 방식에 비해 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

### 참고 문헌

[1] C.K. Kim, "HVDC +1", Worldscientific, 2019