

MMC HVDC의 전도 손실 계산을 위한 V-I 특성 곡선 근사 방법

나종서*, 김상민*, 김희진*, 정종규**, 허건*
 연세대학교 전기전자공학과*, ㈜효성**

Linearization Method of V-I Characteristic for MMC HVDC Conduction Losses Calculation

Jongseo Na*, Sangmin Kim*, Heejin Kim*, Jongkyou Jeong**, Kyeon Hur*
 Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University*, Hyosung**

ABSTRACT

본 논문에서는 모듈러 멀티레벨 컨버터(Modular Multilevel Converter, MMC) 고압직류송전(High Voltage Direct Current, HVDC)의 전도 손실 계산을 위한 반도체 스위치 V-I 특성 곡선 근사 방법을 제안한다. 일반적으로 V-I 특성 곡선은 정격 전류 구간에 대해서만 선형화하여 사용하지만, MMC HVDC의 경우 암 전류의 직류 오프셋에 의해 V-I 특성 곡선의 비선형 구간에서 손실 계산에 오차가 크게 나타난다. 따라서 본 논문에서는 암 전류의 부호에 따라 별도의 V-I 특성 곡선 근사를 적용하여 MMC HVDC의 전도 손실 계산의 정확성을 향상하는 방안을 제안한다. 전도 손실 계산 결과는 PSCAD 시뮬레이션으로 취득한 손실 값과 비교하여 결과를 검증하였다.

1. 서 론

최근 대용량 장거리 송전을 위한 기술로 고압직류송전(High Voltage Direct Current, HVDC) 기술이 주목받고 있다. 특히 모듈러 멀티레벨 컨버터(Modular Multilevel Converter, MMC) HVDC 시스템은 유, 무효 전력을 독립적으로 제어할 수 있고, 약한 계통의 연결에도 적용 가능하므로 많은 제조사가 상품화하여 전력 계통에 적용하고 있으며, 미래의 전력 환경에서 중요한 역할을 할 것으로 예상된다.

MMC HVDC 시스템을 운영하면서 발생하는 손실은 시스템을 구매할 때 비용으로 인식되므로 이를 정확히 평가하는 것이 중요하다. MMC HVDC 시스템의 손실 평가 표준인 IEC 62751-2^[1]에서는 손실 평가를 위해 발생하는 손실을 총 9개로 분류하였다. 그 중, 전도 손실과 스위칭 손실이 가장 큰 비중을 차지하며 전도 손실의 경우 해석적 계산 방법으로 1% 내의 오차로 정확하게 손실을 계산할 수 있다^{[2][3]}. 하지만 게이트 절연 트랜지스터(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)와 다이오드의 V-I 특성 곡선을 선형으로 근사하여 문턱 전압(Threshold voltage)과 온 저항(On-state resistance)을 산정하여 사용하므로 V-I 특성 곡선의 비선형 구간에 해당하는 전류가 흐를 때는 전도 손실 계산의 정확성이 떨어진다. 비선형성으로 인한 오차를 보정하기 위해 본 논문에서는 MMC 암 전류의 부호에 따라 별도의 V-I 특성 곡선 근사를 제안한다.

2. MMC 전도 손실 계산

2.1 IGBT와 다이오드 전도 손실

IGBT와 다이오드의 콜렉터-에미터 전압과 콜렉터 전류의 관계인 V-I 특성은 그림 1과 같이 비선형적인 형태를 가진다. 이를 MMC HVDC의 전도 손실 계산을 위해 1차 함수 형태로 표현하고 다시 전류를 곱한 뒤 평균을 내면 다음과 같이 평균 전도 손실을 구할 수 있다.

$$P_T = V_{0T}I_{c,avg} + R_0I_{c,rms}^2 \quad (1)$$

$$P_D = V_{0D}I_{d,avg} + R_0I_{d,rms}^2 \quad (2)$$

일반적으로 MMC HVDC 시스템의 전도 손실 계산은 식 (1), (2)를 사용해 계산하며, 하나의 문턱 전압과 온 저항을 사용해 계산한다.

2.2 MMC HVDC 전도 손실 계산

MMC HVDC 시스템 전체 전도 손실은 앞서 구한 IGBT와 다이오드 전도 손실의 총합이다. 여기서 각 서브모듈의 모든 동작을 매 순간 알 수 없으므로, 서브모듈의 동작 상태를 확률적으로 나타내어($p_c(\omega t)$) 평균 전류와 실효값 전류를 사용하여 식 (3)-(6)과 같이 계산한다.

$$I_{avg,on} = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega t_1}^{\omega t_2} i_{arm}(\omega t) p_c(\omega t) d(\omega t) \quad (3)$$

$$I_{rms,on} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\omega t_1}^{\omega t_2} i_{arm}^2(\omega t) p_c(\omega t) d(\omega t)} \quad (4)$$

$$I_{avg,off} = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega t_1}^{\omega t_2} i_{arm}(\omega t) (1 - p_c(\omega t)) d(\omega t) \quad (5)$$

$$I_{rms,off} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\omega t_1}^{\omega t_2} i_{arm}^2(\omega t) (1 - p_c(\omega t)) d(\omega t)} \quad (6)$$

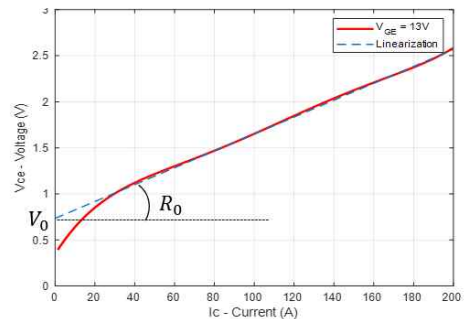


그림 1 IGBT의 V-I 특성 곡선과 선형화
 Fig. 1 V-I characteristic curve of IGBT and its linearization

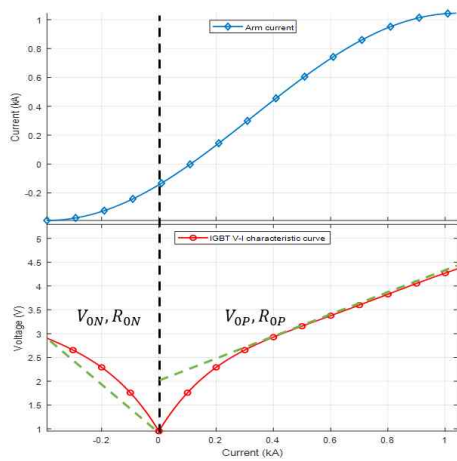


그림 2 암 전류 부호에 따른 IGBT V-I 특성 곡선 선형화
Fig. 2 Linearization of V-I characteristic curve of IGBT according to arm current polarity

3. V-I 특성 곡선 선형화 방법

MMC HVDC가 유효 전력을 송전할 때 인버터와 정류기 모두 암 전류에 DC 오프셋을 가지게 된다. 따라서 암 전류의 부호에 따라 전류의 크기가 V-I 특성 곡선에서 차지하는 비율이 달라진다. 예를 들어, 그림 2와 같이 인버터의 암 전류와 IGBT의 특성 곡선을 보면, 인버터 암 전류는 음수일 때 V-I 특성 곡선의 비선형 구간에서 흐른다. 따라서, 본 논문에서는 전류의 부호에 따라 다른 문턱 전압과 온 저항을 사용하여 전도 손실 계산의 정확성을 높이는 방법을 제안한다.

인버터에서는 암 전류가 양수일 때, 정류기에서는 암 전류가 음수일 때는 기존 방식대로 정격 전류 구간에서 선형화를 하여 전도 손실 계산을 계산한다. 하지만 반대의 경우 암 전류가 첩두 일 때의 값과 암 전류가 0일 때의 값을 사용해 선형화를 한다.

4. 모의실험 결과

제안하는 V-I 특성 곡선 선형화 방법에 대해 타당성을 검증하기 위하여 기존 모의실험 기반의 손실 계산 방법으로 PSCAD 모의실험을 수행하여 전도 손실을 취득하였다. 표 1은 모의실험 파라미터를 나타내고, 그림 3은 모의실험 계산 결과와 정격 전류 구간의 선형화 값만 사용한 경우, 제안한 선형화 방법을 사용한 경우의 결과를 비교하여 차이를 나타낸 것이다. 제안한 방법을 사용하면 시뮬레이션을 통한 계산 결과와의 차이를 줄일 수 있으며, 이를 통해 더 정확한 전도 손실 계산을 수행할 것을 알 수 있다.

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation parameters

파라미터	값	비고
서브모듈 개수	200	암 당
유효전력	400MW	
DC 전압	400kV	
암 인덕턴스	29mH	
AC 전압	220kV	2차측, L-L, rms

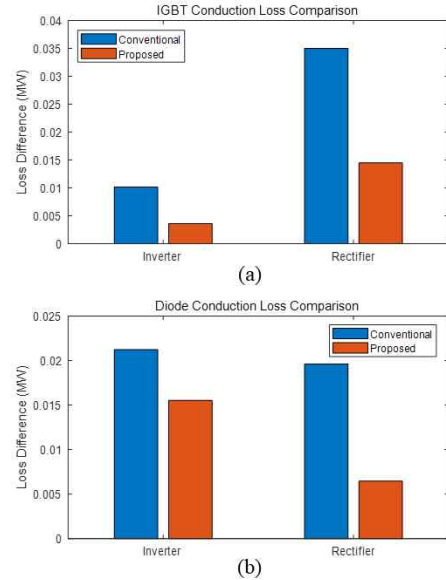


그림 3 (a) 정격 전류 구간의 선형화 값만 사용한 경우와 (b) 제안한 방법을 사용한 경우 전도 손실 계산 결과와 시뮬레이션 손실 계산 결과의 차이
Fig. 3 The loss calculation results difference between simulation and (a) conventional method (b) proposed method

5. 결론

본 논문에서는 MMC HVDC 시스템의 문턱 전압과 온 저항을 암 전류의 부호에 따라 다르게 선정하는 방법을 제시하였다. 제안한 방법은 하나의 문턱 전압과 온 저항을 사용하는 것보다 모의실험을 통해 취득한 예상 손실과 비교하여 오차를 줄인 것을 확인하였다. 본 논문에서 제안하는 방식의 V-I 특성 곡선 선형화를 사용하여 수식 기반의 MMC HVDC의 전도 손실을 정확하게 계산한다면, MMC HVDC 설계 과정에서 정확한 비용 산정 및 스위칭 소자를 선택할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20179310100060)

참고 문헌

- [1] Power Losses in voltage sourced converter (VSC) valves for high-voltage direct current (HVDC) systems - Part 2: Modular multilevel converters, IEC 62751-2, 2014.
- [2] C. Oates and C. Davidson, "A comparison of two methods of estimating losses in the modular multi-level converter," in Proc. 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications, Aug. 2011, pp. 1-10.
- [3] P. S. Jones and C. C. Davidson, "Calculation of power losses for mmc-based vsc hvdc stations," in Proc. 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Sep 2013, pp. 1-10.