

# HILS 적용을 위한 해상풍력 계통 연계 MMC 모델 개발

신동철, 윤진우, 이동명  
 홍익대학교 전자전기공학부

## Development of simulation model for offshore wind power generation with MMC for HILS application

Dong Cheol Shin, Jin Woo Yoon, and Dong Myung Lee

School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

### ABSTRACT

HVDC(High Voltage Direct Current)전력망은 발전소에서 생산한 교류를 직류로 변환한 이후 송전하여 부하에 가까운 전력변환기를 이용하여 교류로 변환한 후에 사용하는 방식이며, 전압형 HVDC에 MMC(Modular Multilevel Converter)가 널리 사용되고 있다. 본 논문에서는 MMC가 적용된 HVDC를 이용한 해상 풍력 계통 제어 성능을 테스트하기 위해 실시간 시뮬레이션 툴인 RT Lab에 적용한 모델에 대해 설명하고자 한다.

### 1. 서론

지난 20년간 유해한 배출을 제거하고 1차 에너지의 무한한 자원을 사용할 수 있는 장점을 지닌 신재생 에너지원에 대한 관심이 증대되고 있다. 특히 풍력발전원은 설비 유지 및 보수에 대한 부담이 적고 청정에너지를 사용함으로써 각광 받고 있다. 다만 완전히 기상여건에 의존함에 따라 적절한 지리적 위치에 집중화되고 대형화되고 있다. 이러한 대용량의 전력을 전송하기 위해서는 효율적인 전송시스템이 필수적이다. 고압 전송 시스템에는 HVAC와 HVDC로 구분된다. HVAC의 경우 세쌍의 선로가 사용되며, 전송 선로가 길어질수록 무효전력에 의한 손실이 발생하는데 이를 보상하기 위한 추가 설비가 필요하다. 한편, HVDC는 한 쌍의 선로만이 필요하며 적은 손실을 갖는다. 이러한 이유로 장거리 간 고압 전송시스템을 위해 HVDC가 대안으로 대두되고 있다. 전압형 HVDC에 적용되는 MMC는 여러 개의 서브모듈을 가진 구조로 다양한 전압레벨을 가지기 때문에 낮은 주파수에도 AC측 출력 파형이 낮은 고조파왜율을 갖는 이점이 있다. 이 때문에 해외 기업은 MMC를 기반으로한 HVDC 기술을 적용하고 있다. MMC를 적용한 HVDC의 제어 성능을 테스트하기 위해서는 HILS와 같은 장비를 통한 제어기의 개발이 필수적이라 할 수 있다. 본 논문은 실시간 시뮬레이터인 OP4510을 사용하여 HILS에 사용될 모델을 개발하고, 이의 결과를 보인다.

### 2. 시스템 모델링

#### 2.1 MMC 모델링

MMC 모델 중 기본 구성이 되는 서브모듈은 타입 4라 불리는 detailed equivalent circuit model로 구현하였으며, 그림 1(a)의 서브모듈의 커패시터와 스위치를 식 (1),(2)를 이용하여

그림 1(b)와 같이 전압원과 저항으로 표현할 수 있으며<sup>[1]</sup>, 이를 그림 1(c)와 같이 노튼 등가회로로 변환시켜 구현하였다.

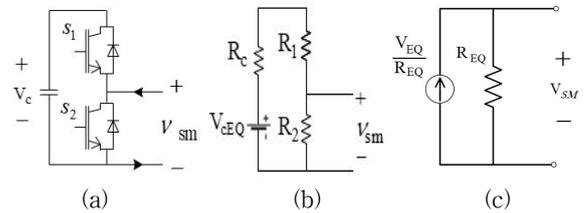


그림 1. (a) 서브모듈의 구성, (b) 서브모듈의 등가 모델, (c) 서브모듈의 노튼 등가회로

$$R_c = \frac{\Delta T}{2C} \quad (1)$$

$$V_{cEQ}(t - \Delta T) = \frac{\Delta T}{2C} I_c(t - \Delta T) + V_c(t - \Delta T) \quad (2)$$

#### 2.2 해상풍력 연계 HVDC 모델링

그림 2는 실시간 시뮬레이터를 사용하기 위한 시뮬레이션 툴인 RT Lab을 통해 수행된 시뮬레이션 모델의 구성 중, OP4510에서 수행되는 Master subsystem의 내부를 보여준다. 본래 최상위 블록은 Master subsystem과 Console subsystem 2가지로 구성되며 복잡한 시스템을 담당하는 Master subsystem은 실시간 시뮬레이터를 통해, 데이터의 결과 값과 시스템의 제어를 담당하는 Console subsystem은 유저 PC에서 수행되어 실시간 시뮬레이션을 이루어지게 한다. 지면상 Master subsystem만 보이도록 한다. 그림 1에서 보이는 바와 같이 MMC는 계통과 해상풍력 발전원 사이에 위치하며 NLC(Nearest Level control) 스위칭 방식의 MMC로 모델링되었다. 계통은 AC전압원으로 나타내었고 해상풍력 발전원은 엑셀 데이터를 통해 풍속에 따라 크기가 가변되는 풍속 전류원으로 모델링하여 MMC의 직류단에 연결하였다. 모델의 파라미터는 표 1과 같다.

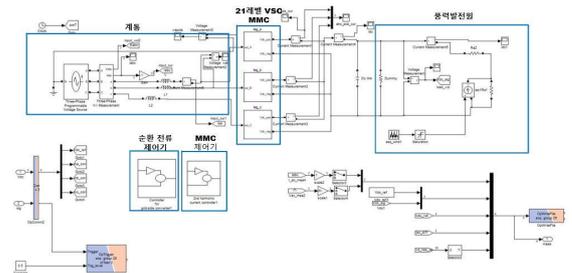


그림 2. RT-LAB을 이용한 해상풍력 계통 연계 HVDC 모델

표 1 시스템 파라미터

Quantity	Value	Comment
P.F(power factor)	1	역률
$L_{arm}$	3 mH	암 인덕터의 인덕턴스
$R_{arm}$	0.5 $\Omega$	암 인덕터의 저항
$C_{sm}$	3 mF	서브모듈 커패시턴스
$L_L$	1 mH	계통측 인덕턴스
$v_{a\phi}$	220 Vrms	계통측 상 전압
$V_d$	750 V	DC 측 전압
$C_d$	7.5 mF	DC 측 커패시턴스
$N$	20	암 당 서브모듈의 수
$f_{sw}$	5 kHz	NLC 스위칭 주파수
$f_s$	60 Hz	AC 측 주파수
$i_{wind}$	5A	해상풍력발전원 모사 전류

MMC 제어기를 블록도로 표현하면 그림 3과 같다. DC단 전압 제어기와 PLL(Phase Locked Loop), 전류제어기, 좌표변환을 통해 상 전압지령을( $v_{s\phi}^*$ ) 생성해준다.

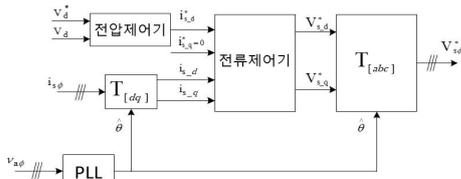


그림 3. MMC 제어기 블록도

순환전류제어기를 블록도로 표현하면 그림 4와 같다. 순환전류의 2고조파 성분은 암 간 흐르는 공통전류로 컨버터의 손실을 야기하므로 반드시 제거되어야 한다. 이를 위해 순환전류제어기를 통해서 계산된 내부 불평형 전압( $u_{c\phi}$ )을 포함한 상,하단 암 전압 지령을 표현한 식은 식 (3),(4)와 같다.<sup>[2]</sup>

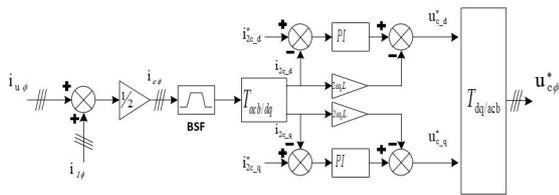


그림 4. 순환전류 제어기 블록도

$$v_{u\phi}^* = \frac{V_d}{2} - v_{s\phi} - u_{c\phi}^* \quad (3)$$

$$v_{l\phi}^* = \frac{V_d}{2} + v_{s\phi} - u_{c\phi}^* \quad (4)$$

### 3. 시뮬레이션 결과

개발된 해상풍력연계 HVDC 시스템 모델링의 시뮬레이션 결과는 그림 5와 같다. 그림 5에서 보면 DC단 전압이 750V로 일정하게 제어가 되고 있으며, PF가 1임을 1/10으로 스케일링

조정한 상 전압 상전류 파형을 통해 확인할 수 있다. 또한 상하단 전압파형을 통해 전압 밸런싱이 이루어지고 있고, 순환전류의 2고조파 성분을 제거함으로써 서브모듈의 커패시터 전압 또한 직류단 전압을 암당 서브모듈의 수로 나눈 37.5V로 제어됨을 확인할 수 있다.

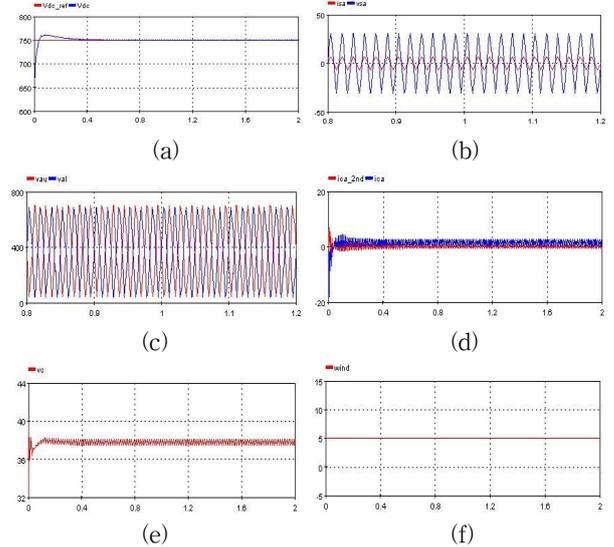


그림 5. 시뮬레이션 결과: (a) 직류단 전압(Vdc) 파형, 수직:50V/div 수평: 0.4s/div, (b)상 전류(isa) 1/10 스케일링 조정된 상 전압(vsa) 파형, 수직:50A/div, 50V/div 수평:0.1s/div, (c)상 하단 암 전압 파형, 수직:400V/div 수평: 0.1s/div, (d) 순환전류(ica), 순환전류의 2고조파 파형, 수직:20A/div 수평:0.4s/div, (e) 서브모듈 커패시터 전압 파형, 수직 4V/div 수평: 0.4s/div, (f) 풍력발전 전류 파형, 수평:5A/div 수직:0.4s/div

### 4. 결론

본 논문은 실시간 시뮬레이터인 OP4510을 통해 수행될 수 있는 해상풍력 연계 HVDC를 모델링하였으며, 이를 통해 제작되는데 많은 비용과 시간이 필요한 MMC를 시뮬레이션으로 모사하고 제어기를 하드웨어로 구현할 시 확인하기 힘든 MMC의 고장 상태 등을 검증할 수 있으며, 시뮬레이션만으로 수행될 시 부족한 부분을 보완할 수 있다. 개발된 모델이 전압형 HVDC 제어 연구의 안정성, 경제성과 신뢰성 향상에 기여할 것으로 본다.

본 연구는 한국전력공사의 2016년 선정 기초연구개발과제 연구비에 의해 지원되었음(과제번호 :R17XA05-18).

### 참고 문헌

- [1] U.N. Gnanarathna, A.M. Gole, and R.P. Jayasinghe, "Efficient modeling of modular multilevel HVDC converters(MMC) on electromagnetic transient simulation programs," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 1, pp. 316-324, Jan. 2011.
- [2] Q. Tu, Z. Xu and L. 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, July 2011.