

# 해상 풍력 연계 MMC 제어 알고리즘 개발을 위한 OPLA-RT 기반의 HILS 구축

신동철, 윤진우, 이동명  
 홍익대학교 전자전기공학부

## Implementation of OPLA-RT based HILS system for developing MMC control algorithm of offshore wind power

Dong-Cheol Shin, Jin-Woo Yoon, and Dong-Myung Lee  
 School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

### ABSTRACT

본 논문은 HVDC(High Voltage Direct Current)에 적용된 MMC(Modular Multilevel Converter)의 제어 알고리즘 개발을 위한 HILS(Hardware In the Loop Simulation)을 위한 모델링 및 HILS 시스템 구축 예를 보인다. 전력 계통, MMC, 풍력 발전 등의 HILS 적용 MATLAB/SIMULINK 모델 및 FPGA(Field Programmable Gate Array)를 이용한 제어기 개발 내용을 보인다. 시뮬레이션 모델과 FPGA 제어기를 이용하여 구축한 OPAL-RT 기반의 실험 결과를 보인다.

### 1. 서론

최근 환전 안경에 대한 의무가 법제화됨에 따라 1차 에너지의 무한한 자원을 사용할 수 있고 유해한 배출을 제거할 수 있는 장점을 지닌 태양광 및 풍력과 같은 신재생 에너지원에 대한 투자가 신규 발전원 중 최고 수준에 이르는 등 이에 대한 관심이 증대되고 있으며, 특히 태양광보다 연속적이며 태양광 발전보다 같은 출력 대비 적은 공간을 갖는 장점을 지닌 풍력 발전원이 각광받고 있다. 다만 풍력의 경우 기상여건에 의존하기에 한정된 지리적 위치에 집중화되어 있다. 이러한 대용량의 전력을 전송하기 위해 전압형 HVDC에 관한 연구가 활발히 진행 중에 있으며 MMC는 그 중 변환 기술에 해당한다. 전압형 HVDC를 위해 연구되었던 기존의 멀티레벨 컨버터로 NPC(Neutral Point Clamped) 컨버터와 FC(Flying Capacitor) 컨버터 등이 있었지만 MMC는 낮은 전압을 지닌 서브모듈의 직렬화로 높은 전압을 다양한 레벨의 전압으로 대응할 수 있기에 출력 전압의 전고조파 왜율이 낮으며, 이로 인해 추가적인 필터가 불필요하다. 이러한 장점으로 해외 기업들은 MMC를 적용한 HVDC 기술을 적용하고 있다.<sup>[1]</sup> 해상 풍력 연계 HVDC 용 MMC 제어기의 성능을 테스트 시 HILS(Hardware In the Loop Simulation)와 같은 장비를 통한 연구가 필수적이다. 본 논문은 MMC와 해상 풍력 모델링 및 FPGA를 이용하여 개발한 제어기를 실시간 시뮬레이터인 OP4510을 사용한 HILS 시스템을 제안하며, 실험을 통해 제안하는 방법을 검증한다.

### 2. HILS를 위한 MMC 적용 HVDC 연계 풍력 발전 시스템 모델링

개발한 해상 풍력 연계 MMC 모델은 그림 1과 같이, Back-to-back 구조로 2대의 MMC가 존재하며, 담당 30개의 서브모듈이 존재한다. 계통과 풍력발전원은 각각 MMC의 AC 측에 연결되어 있고, 표 1의 파라미터를 이용하여 풍력발전원에서 발전된 전력을 계통으로 전달하도록 모델링하였다.

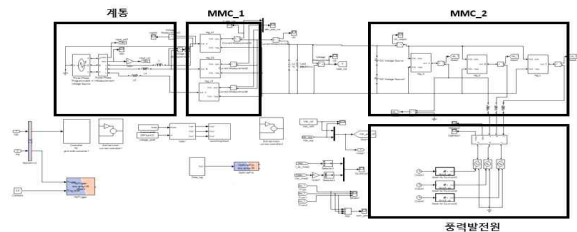


그림 1 해상 풍력 연계 MMC 모델

표 1 풍력발전 시뮬레이션 적용 파라미터

Value	Comment
0.8	발전기 역률
500W	풍속 7~10m/s 시 발전 유효전력
700W	풍속 10~15m/s 시 발전 유효전력
10mH	선로 측 모사 인덕턴스

### 2.1 MMC 모델링

MMC의 서브모듈은 그림 2(a)와 같이 2개의 스위칭 소자와 커패시터로 이루어진다. 이는 식 (1),(2)를 사용하여 그림 2(b)와 같이 전압원과 저항으로 모델링되며, 서브모듈의 직렬연결인 밸브는 그림 2(c)와 같이 노튼 등가회로로 구현한다.<sup>[2]</sup>

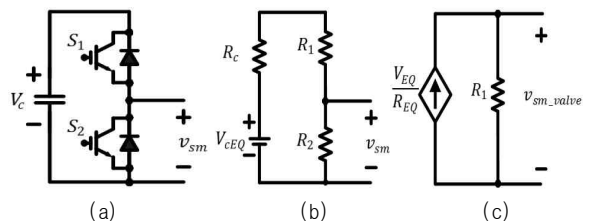


그림 2 (a) 서브모듈의 구성, (b) 서브모듈의 등가 모델, (c) 서브모듈 밸브 노튼 등가회로

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

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

## 2.2 해상 풍력 모델링

본 논문에서 사용된 해상 풍력은 그림 3과 같이 DFIG 풍력 발전 시스템을 3상 중속 전압원을 이용하여 모델링한다. 식 (3),(4)는 AC 전원 간 전력 전송 식으로 이를 이용하여 풍속에 따른 유·무효 전력( $P_s, Q_s$ )를 제어한다. 여기서  $E_s$ 는 중속전압원의 전압,  $E_r$ 은 풍력 발전과 연결된 MMC의 AC 측 전압,  $\delta$ 는 두 전압 간의 위상차,  $X$ 는 선로 임피던스이다.

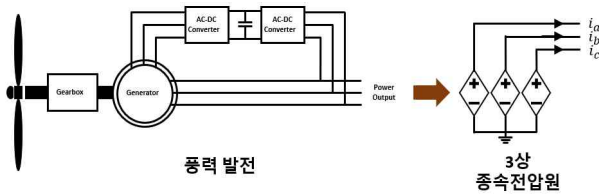


그림 3 풍력발전 시스템 모델링 기본 아이디어

$$P_s = \frac{E_s E_r}{X} \sin \delta \quad (3)$$

$$Q_s = \frac{E_s^2 - E_s E_r \cos \delta}{X} \quad (4)$$

## 3. FPGA를 이용한 MMC 제어기

본 논문에서 제어기는 연산 과정의 병렬화로 인한 빠른 속도와 알고리즘의 모듈화로 다양한 시스템에 적용시키기 위해 FPGA를 이용하여 MMC의 DC단 전압을 제어하기 위한 제어기의 설계하였다. DE1-SoC 보드에 내장된 FPGA인 Cyclone® V 5CSEMA5F31C6N에 Verilog HDL를 이용하여 ADC 변환, 연산, 출력값 업데이트를 설계하였으며, 그림 4에서 그에 대한 상태 머신을 다이어그램을 보인다.

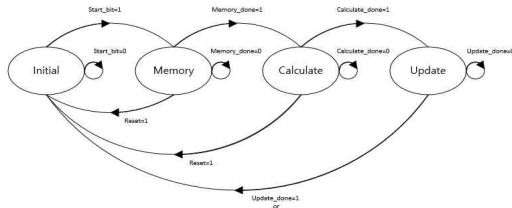


그림 4 FPGA를 이용한 제어기의 상태 머신 다이어그램

## 4. HILS 구축 및 실험 결과

구축한 HILS 환경은 그림 5와 같이 ①OP4510, ②DE1-SoC 보드, ③신호레벨변경보드(SN74LVC16T 245), ④3.3V 레귤레이터(IRU1050-33), ⑤220V AC - 5V DC 컨버터(eFS30-5)로 구성되며, 그림 6에서 실험 결과를 보인다. 풍력 발전으로부터 발전된 전력은 DC 단 전류( $i_{dc}$ )의 변화를 통해 보이며, DC 단을 통해 계통 측으로 전달된 발전량을 계통 측 상 전류( $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ )에서 확인할 수 있다. 이러한 전력 전송 과정에서 DC 단 전압( $V_{dc}$ )는 지령치( $V_{dc.ref}$ ) 값인 700V로 안정된 전압을 유지한다.

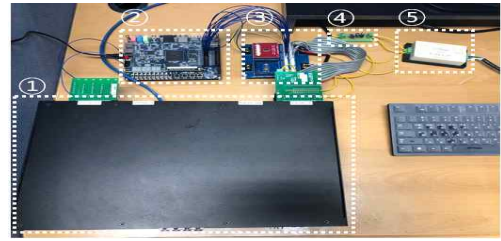


그림 5 HILS 구축 환경

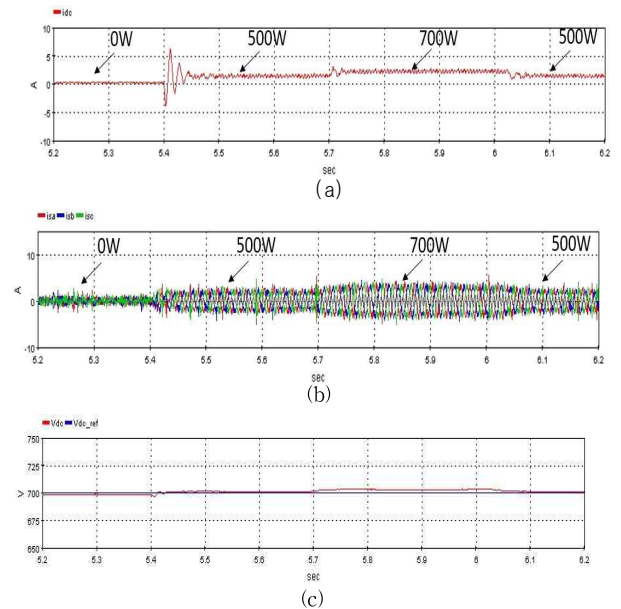


그림 6 실험 결과: (a) DC 단 전류, (b) 계통 측 상 전류, (c) DC 단 전압

## 4. 결론

본 논문은 OP4510과 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 실시간 시뮬레이션이 가능한 MMC 및 유·무효 전력 제어가 가능한 풍력 발전을 모델링하였으며, FPGA를 이용한 제어기의 개발을 보인다. 제어기를 테스트하기 위해 해양 풍력 연계 MMC 모델을 시뮬레이션으로 두고 FPGA 제어기를 하드웨어로 구성하여 HILS 실험을 하였으며, 풍력 발전과 같은 실제 조건에서 테스트하기 어려운 상황을 모사하여 제어기를 검증하였다.

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

## 참고 문헌

- [1] K. Meah, and S. Ula, "Comparative evaluation of HVDC and HVAC transmission systems," *Power Engineering Society General Meeting IEEE*, pp. 1-5, June 2007.
- [2] 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.