

Star 형 EtherCAT 통신 구조 기반 MMC 제어 시스템 구현

이승준*, 김동준*, 박재연*, 이승용**, 정재정**, 최성휘*
 서울대학교*, 경북대학교**

EtherCAT Star topology based MMC control system implementation

Seungjun Lee*, Dongjoon Kim*, Jaeyeon Park*, Seungyong Lee**,
 Jae-Jung Jung**, and Shenghui Cui*
 Seoul National University*, Kyungpook National University**

ABSTRACT

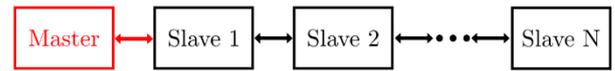
본 논문에서는 Star 형 EtherCAT 통신 구조 기반 Modular Multilevel Converter(MMC) 제어 시스템을 제안한다. 제안된 제어 시스템은 기존 제어 시스템의 Daisy Chain 통신 구조에 비해 높은 신뢰성을 가지며, 다중 bus를 통한 1 Gbps 통신으로 슬레이브 개수가 증가함에 따른 통신 오버헤드를 분산시켰다. 제안된 MMC 제어 시스템을 사용하여 OPAL-RT HIL 시뮬레이션을 수행하였으며, 해당 시뮬레이션 결과를 통해 그 성능을 검증하였다.

1. 서론

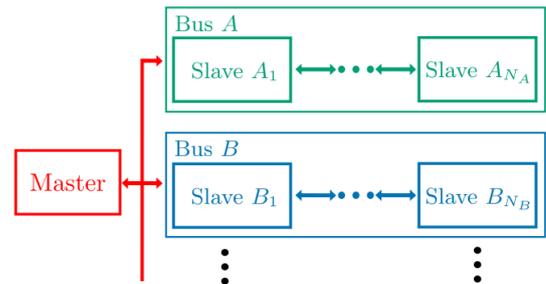
현대 전기공학에서 전력전자 분야는 전기 에너지 변환과 제어를 높은 효율성과 정밀성으로 이루어지게 하는 중추적인 분야로 자리잡고 있다. 특히 Modular Multilevel Converter (MMC) 토폴로지는 High-Voltage Direct Current (HVDC) 및 Medium-Voltage Direct Current (MVDC) 전력 시스템, 재생 에너지 시스템, 그리고 다양한 산업 응용 분야의 구성 요소로 부상하고 있다. 한편 Ethernet for Control Automation Technology (EtherCAT) 통신 프로토콜은 고속 데이터 전송과 우수한 실시간 통신 능력으로 인해 주목을 받고 있으며, 이를 MMC 제어 시스템에 적용한 연구가 진행된 바 있다^[1].

해당 연구에서 제안된 제어 시스템은 Daisy Chain 통신 구조를 사용하였는데, 이 방식은 단순하고 구현이 간편하다는 장점이 있어 일반적인 통신 시스템에서 쉽게 사용할 수 있다. 그러나 Slave 수가 증가함에 따라 통신 오버헤드 처리 측면에 제약이 있으며, 고속 통신 상황에서의 정주기성을 보장할 수 없어 통신 기반 제어 시스템의 신뢰성을 담보하기 어렵다. 따라서 실질적인 MMC 제어 시스템에 적용하기 힘들다.

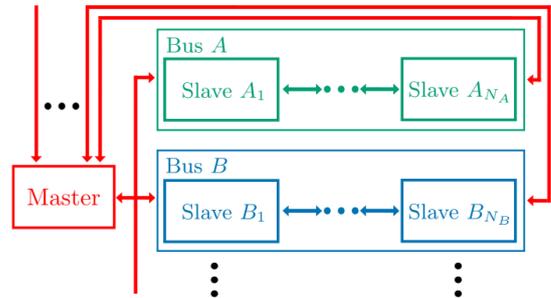
이에 본 논문에서는 Star 형 EtherCAT 광통신 구조 기반 MMC 제어 시스템을 제안한다. Daisy Chain 통신 구조와 비교하여 Star 형 통신 구조의 장점을 설명한 후, 제안한 제어 시스템을 실제로 구현한 방식에 대해 기술한다. 제안한 시스템을 Control Hardware-In-the-Loop Simulation (C-HILS)로 검증한다.



(a)



(b)



(c)

그림 1 (a) Daisy Chain 통신 구조 모식도, (b) Star 형 통신 구조 모식도, (c) Star 및 Ring 형 통신 구조 모식도

2. Star 형 EtherCAT 기반 MMC 제어 시스템

2.1 Daisy Chain 통신 구조와의 비교

그림 1(a)는 Daisy Chain 통신 구조를 보여주며, Slave들이 단일 Bus를 통해 이웃한 Slave들과 직렬로 연결된 형태를 취한다. 단순한 연결 구조로 그 구현이 간편하며, 해당 구조를 MMC 제어 시스템에 적용하면 MMC의 모든 서브모듈 제어기가 통신을 통해 하나의 단일 bus로 묶인다^[2].

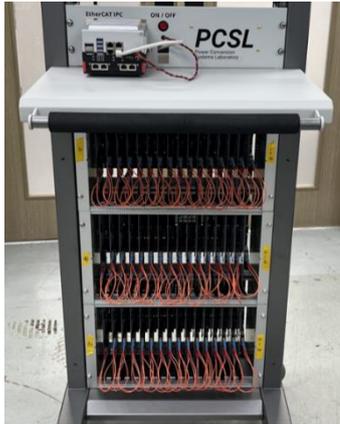
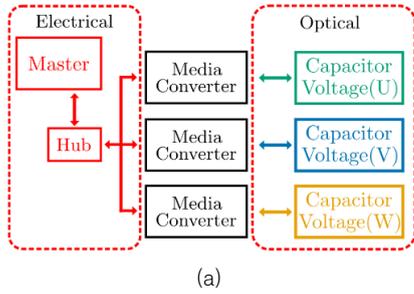


그림 2 Star 형 EtherCAT 광통신 시스템 (a) 모식도, (b) 구현

원활한 디지털 제어 및 컨버터 폴트 탐지를 위해서는 정주기적인 제어가 보장되어야 하므로, 통신 오버헤드를 고려하지 않으면 제어시스템의 확장이 어려울 수 있다.

위와 같은 문제를 방지하기 위해 그림 1(b)과 같은 Star 형 통신 구조를 고려할 수 있다. Star 형 통신 구조는 Bus의 개수만큼의 포트를 필요로 하지만, 특정 서브모듈이 고장나도 해당 Bus을 제외한 곳들은 정상적으로 통신할 수 있어 전체적인 통신의 신뢰성이 향상된다. 또한, 통신 오버헤드가 분산되기 때문에 통신의 안정성도 향상된다. 더하여 그림 1(c)과 같이 Master 측 통신 포트를 추가하여 Star 형 통신 구조의 각 Bus에 Ring 형 통신 구조를 구현한다면, 각 Bus에서 한 개의 서브모듈 고장까지 용인할 수 있어 통신 기반 제어의 신뢰성을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

2.2 제어 시스템의 구현

상술한 Star 형 통신 구조의 장점을 고려하여, Daisy Chain 구조로 운용하던 MMC 제어 시스템을 Star 형 구조로 변경하였다. 통신의 Master로 Beckhoff 사의 Industrial PC(IPC)를 사용하였고, Star 형 네트워크 구현을 위해 동사의 1 Gbps 통신 분배기를 사용하였다. 또한 안정적인 통신 구현을 위하여 EtherCAT 광통신 Slave로 제어 시스템을 구성하였고, 통신의 호환성을 위해 Master의 입출력단에 광변환기를 배치하였다. 이를 통해 실제로 구현한 MMC 제어 시스템은 그림 2(a), 그림 2(b)과 같다.

3. OPAL-RT 기반 C-HILS를 통한 검증

3.1 시뮬레이션 구성

그림 3과 같은 Active Front-End 계통 연계 MMC에 대해 시뮬레이션을 진행하였으며, 주요 파라미터는 표 1와 같다. OPAL-RT 장비와 제안하는 MMC 제어 시스템으로 시뮬레이션을 구성하였고, 모의한 최대 부하 상황(유효전력 10 MW 출력)에서의 정상 상태 운전, 부하를 증가시키는 과도 상태에서의 운전 영역에 대해 실시간 모의실험을 진행하였다. 그림 3의 위치에 해당하는 지점의 전압/전류를 측정하였다.

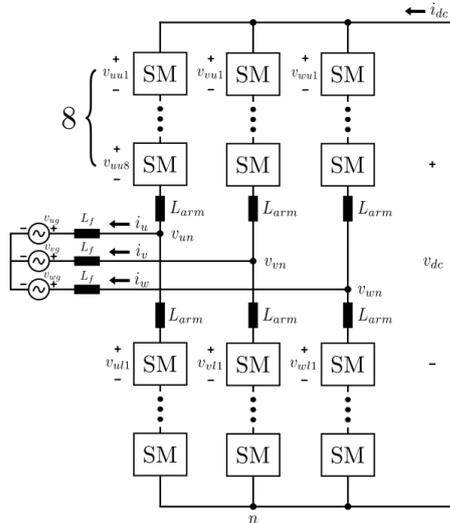


그림 3 OPAL-RT HIL 시스템에서 구현한 MMC 모식도

샘플링 주파수	5 kHz
DC 단 정격 전력	10 MW
DC 단 정격 전압	10 kV
AC 단 정격 전압	4.16 kVrms
서브모듈 커패시터 값	7.3 mF
암 인덕터 값	167 μH
암 당 서브모듈 개수	8

그러나 Daisy Chain 통신 구조를 MMC 제어 시스템으로 활용하기에는 두 가지 한계점이 존재한다. 첫째로 특정 경로에서 통신이 끊길 경우, 단선된 지점 이후의 장치들은 모두 통신할 수 없다. 통상적으로 각 서브모듈을 제어하는 Slave의 제어 전원은 서브모듈의 커패시터에서 공급되는데, 모든 Slave들이 직렬 연결된 Daisy Chain 구조 상 하나의 서브모듈이라도 고장난다면 해당 Slave와 이후 Slave들의 정상적인 통신이 불가하다. 따라서 고장난 서브모듈을 우회해 운전하는 MMC의 고장 허용 운전이 불가하다. 둘째로, 서브모듈이 증가함에 따라 단일 데이터 bus에서 발생하는 통신 오버헤드가 증가해 제어의 정주기성에 악영향을 줄 수 있다.

3.2 시뮬레이션 결과

그림 4는 DC 단 정격 부하 상황에서의 정상 상태 운전 파형을 보여준다. 해당 측정 결과들을 통해 각 서브모듈 정격 전압 밸런싱 및 출력 전류 제어가 안정적으로 작동하는 것을 확인하였다. 또한, 모의하는 DC 단 부하를 계단 형태로 증가시키는 과도 상태에서의 MMC의 동작은 그림 5과 같았다. 과도 상태 중간 지점에서 시간 축을 확대한 파형을 측정할 결과, 과도 상태에서의 MMC 제어 또한 정상적으로 수행되는 것을 확인하였다.

두 운전 상황에서 모두 커패시터의 전압 변동폭이 설계한 150 V 이내로 동작함을 확인했다. 해당 시뮬레이션 결과들을 통해 제안된 MMC 제어 시스템의 제어 성능을 검증하였다.

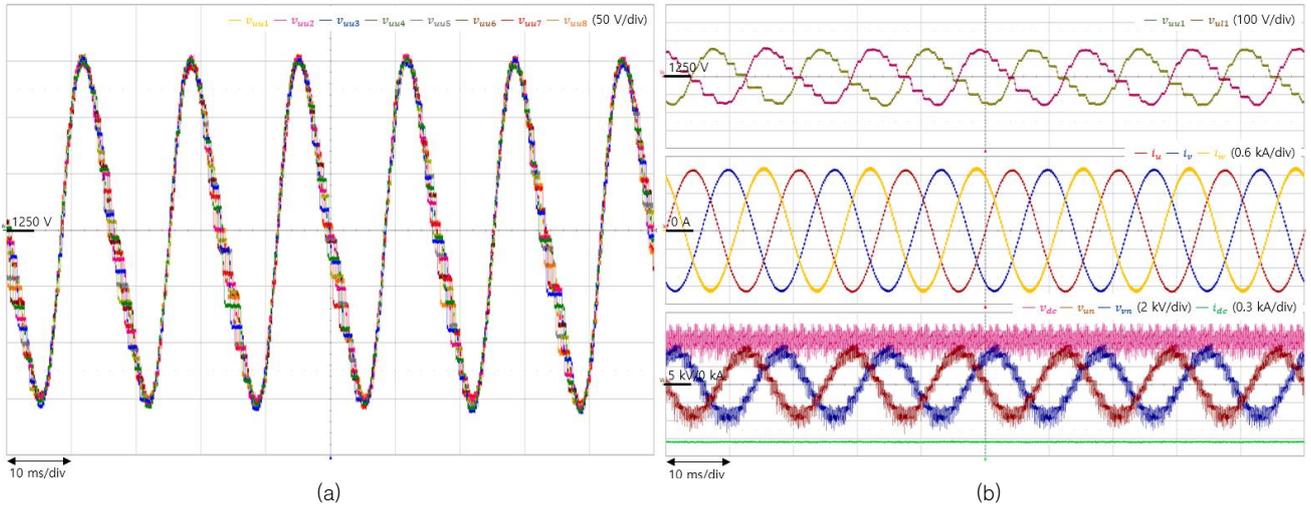


그림 4 Star 형 EtherCAT 광통신을 활용한 MMC의 AFE 동작 시 (a) 정상상태에서 U상 상단 암 서브모듈들의 커패시터 전압 파형 (b) 정상상태에서 (위에서부터) U상 상/하단 암 서브모듈들의 커패시터 전압 파형, U/V/W 상의 상전류, U/V 상의 폴전압 및 DC 축 전압/전류

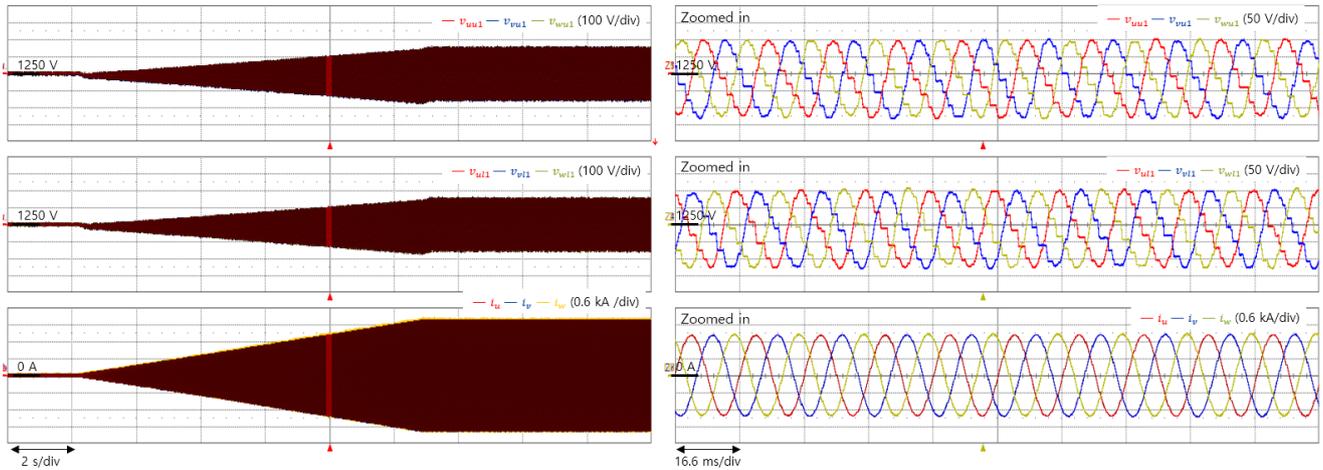


그림 5 Star 형 EtherCAT 광통신을 활용한 MMC의 AFE 동작 시 과도상태에서 (위에서부터) U/V/W상 상단 암 서브모듈들의 커패시터 전압 파형(좌) 및 확대 파형(우), U/V/W상 하단 암 서브모듈들의 커패시터 전압 파형(좌) 및 확대 파형(우), U/V/W상 상전류 파형(좌) 및 확대 파형(우)

4. 결론

본 논문에서는 Daisy Chain 통신 구조에 비해 신뢰성과 통신 오버헤드 처리 능력이 뛰어난 Star 형 통신 구조 기반 MMC 제어 시스템을 제안하였다. 기존의 Daisy Chain 구조로 형성된 MMC EtherCAT 광통신 시스템에 통신 분배기를 추가하여 Star 형 시스템을 구현하였고, OPAL-RT 기반 MMC C-HILS를 통해 그 성능을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] 박재연, 김동준, 최성휘, and 설승기, "EtherCAT 통신을 이용한 PC 기반의 실시간 제어 시스템 설계 및 구현," in 전력전자학회 학술대회 논문집, 2022, pp. 16–18.
- [2] 김동준, 박재연, and 최성휘, "EtherCAT 제어 시스템 기반 MMC 유도전동기 드라이브," in 전력전자학회 학술대회 논문집, 2023, pp. 219–221.

이 논문은 HD한국조선해양의 연구비 지원에 의하여 연구되었음