

EtherCAT 제어 시스템 기반 MMC 유도전동기 드라이브

김동준, 박재연, 최성희
서울대학교

Induction Motor Drive based on EtherCAT MMC Control System

Dongjoon Kim, Jaeyeon Park, Shenghui Cui
Seoul National University

ABSTRACT

본 논문에서는 EtherCAT 통신 기반 Modular Multilevel Converter(MMC) 제어 시스템을 제안한다. 제안된 EtherCAT 통신 기반 제어 시스템의 Slave 간 실시간 동기화, PC 기반 제어를 통한 제어기 연산 시간 확보 등의 장점을 소개하며, 40개의 Slave로 구성된 경우에 대해 디지털 샘플링 시지연 성능을 검증한다. 또한 제안된 MMC 제어 시스템을 사용하여 유도전동기 구동 실험을 수행하였으며, 해당 실험 결과를 통해 EtherCAT 통신 기반 MMC 제어 시스템의 제어 성능 및 가능성을 검증하였다.

1. 서 론

기존에 제안된 EtherCAT 통신 기반 제어 시스템은 통신으로 인한 디지털 시지연을 하나의 샘플링 주기로 최소화했으며^[1], 2개의 Slave를 사용하여 컨버터 병렬 제어 시 Slave 간 실시간 동기화 및 PC 기반 제어 성능이 검증되었으며 해당 제어 시스템을 사용한 모듈형 컨버터 제어 가능성 또한 검토되었다^[2].

하지만 실제 모듈형 컨버터는 많은 모듈, 즉 더 많은 Slave로 구성되므로 제어 시스템의 성능을 완전히 검증하기에는 위에서 논의된 것만으로는 부족하다.

따라서 완전한 검증을 위해 본 논문에서는 제안된 EtherCAT 통신 기반 제어 시스템을 Modular Multilevel Converter(MMC) 제어에 적용했다. 40개의 Slave로 구성된 제어 시스템의 통신으로 인한 디지털 시지연 성능을 검증했으며, 구성한 MMC 제어 시스템을 사용하여 유도전동기 구동 실험을 수행했다. 해당 실험 결과를 통해 제안된 MMC 제어 시스템의 제어 성능 및 가능성을 검증했다.

2. EtherCAT 통신 기반 MMC 제어 시스템

2.1 제어 시스템 구성

EtherCAT 기반 MMC 제어 시스템 구성은 그림 1과 같다. 우선 MMC의 각 서브모듈에 EtherCAT Slave 한 개씩 각각 대응시켰다. EtherCAT Slave 보드는 EtherCAT Slave Controller(ESC)와 DSP가 내장되어 있어 EtherCAT 통신이 가능하며 ADC 및 PWM Duty 출력이 가능하다. 각각의 Slave는 서브모듈 캐패시터 전압 값을 센싱하여 그 정보를 Master로 보내고, Master에서 보내준 Duty를 받아 게이팅 신호를 서브모듈에 보내는 역할을 수행한다.

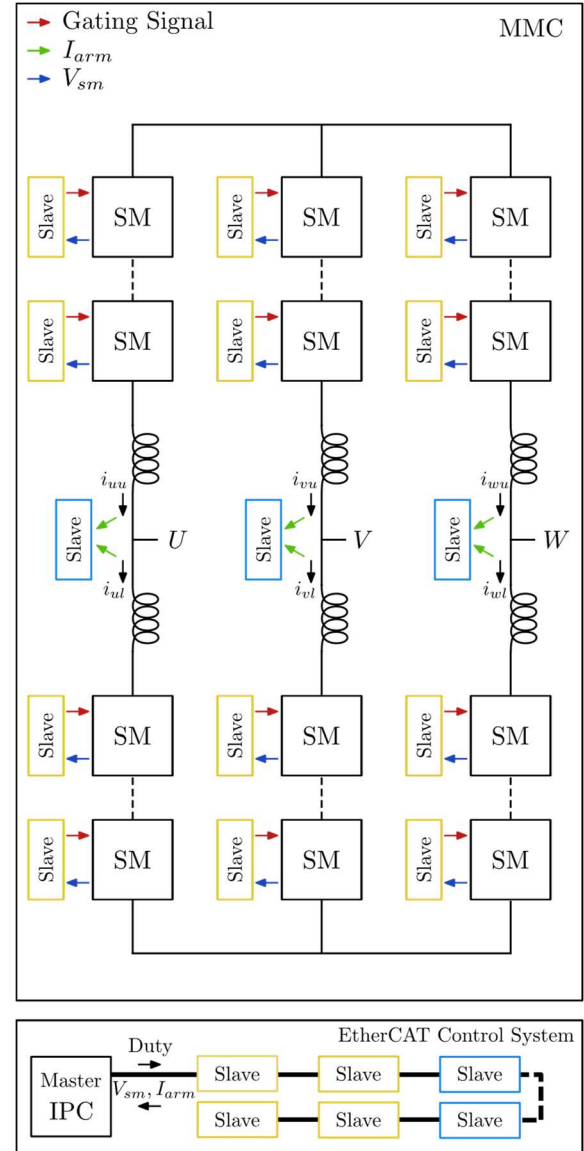


그림1 MMC 제어 시스템 구성

해당 Slave는 MMC 암 당 6개로 총 36개의 Slave를 사용했다. 또한 MMC 각 암에 흐르는 전류를 센싱하기 위해 추가적인 Slave 보드 3개를 사용하였으며, 모터 구동을 위해 엔코더 정보를 받아오는 Slave 1개까지해서 총 40개의 Slave로 통신을 구성했다.

EtherCAT Master는 Beckhoff 사의 Industrial PC(IPC) 제품을 사용했다. 기존에 제안된 EtherCAT 통신 기반 제어 시스템은 노트북을 Master로 사용했으나, Slave 개수가 늘어났을 때 통신 성능을 유지하기 위해 IPC를 사용하였다. Master는 Slave 간 실시간 동기화 및 통신 상황을 지속적으로 모니터링하며, Slave에서 보낸 전압, 전류, 엔코더 신호를 받아 MMC 제어 알고리즘을 수행하고 그 결과로 나온 Duty를 각 서브모듈 Slave로 보내는 역할을 수행한다. MMC 제어 알고리즘은 TwinCAT3를 사용하여 C++ 프로그래밍으로 구현하였다.

2.2 디지털 시지연 측정

앞서 구성한 EtherCAT 기반 MMC 제어 시스템 통신 성능을 검증하기 위해 40개의 Slave를 그림 2와 같이 Daisy Chain으로 연결한 뒤 통신으로 인한 디지털 시지연을 측정하였다.

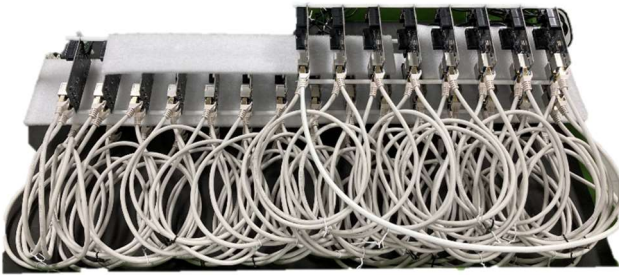


그림2 EtherCAT Slave 40개 Daisy Chain

5 kHz 샘플링 조건에서 통신으로 인한 디지털 시지연을 측정하기 위해 우선 Slave 동기화 신호인 SYNC0 발생 빈도를 5 kHz로 설정하였다. 해당 신호의 Rising Edge에서 PWM 캐리어가 동기화되며, Slave는 Master에서 보낸 Duty 값을 일정 시간 이후에 출력하게 된다.

그리고 디지털 시지연 검증 과정을 단순화하기 위해 모든 Slave 보드의 DSP에 간단한 알고리즘을 구현하였다. DSP의 특정 GPIO 출력을 1 ms, 즉 5배의 샘플링 주기가 지나면 값을 토글하도록 하였고, 해당 신호가 켜졌을 경우 Master에 0.7 Duty 비를 전송하고 꺼졌을 경우에는 0 Duty 비를 전송하게 하였다.

마지막으로 Master는 Slave가 보낸 Duty 비 값을 해당 Slave에 다시 보내주는 일종의 Loopback 형태로 동작하게끔 프로그래밍한 뒤 SYNC0, GPIO 출력, PWM 출력을 측정하였다.

40개의 Slave 중 첫 번째 Slave와 마지막 Slave의 신호를 측정한 결과 그림 3과 같이 GPIO 출력이 1이 되고 한 샘플링 주기만에 PWM 출력 Duty 비가 0.7로 반영되는 것을 확인할 수 있었으며, GPIO 출력이 0이 되고 한 샘플링 주기만에 PWM 출력 Duty 비가 0으로 반영되는 것을 확인하였다. 이를 통해 40개의 Slave로 구성된 EtherCAT 제어 시스템의 통신으로 인한 디지털 시지연 성능을 검증하였다.

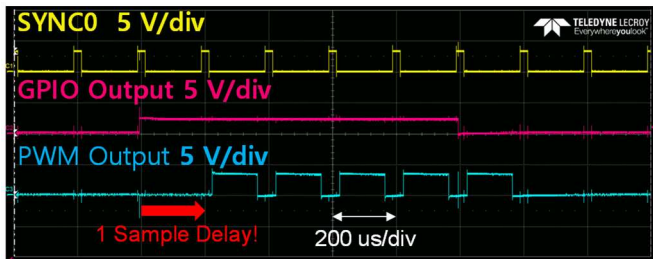


그림3 디지털 시지연 측정 결과

2.3 MMC 제작

앞서 다룬 방법으로 통신 성능을 검증한 뒤 유도전동기 구동 실험을 위해 EtherCAT 통신 기반 MMC 제어 시스템을 탑재한 MMC를 제작하였다.

MMC의 각 암에 들어가는 서브모듈은 IPM 하프 브리지 모듈을 사용했고, EtherCAT Slave와 호환되는 IPM 인터페이스 보드를 제작하여 하나의 서브모듈을 구성했다. 서브모듈은 총 36개 제작하여 탑재하였으며 EtherCAT Slave는 40개를 탑재했다. 제작된 MMC의 모습은 그림4, 그림5와 같다. 그림4는 MMC 전면인 통신부로, 각 서브모듈에 대응되는 Slave들이 랜선으로 서로 연결되어 있는 것을 볼 수 있다. 그림 5는 MMC 후면 파워부로, 버스바를 통해 서브모듈들이 연결되어 MMC 토폴로지를 구성하고 있는 것을 볼 수 있다.



그림4 MMC 전면(통신부)

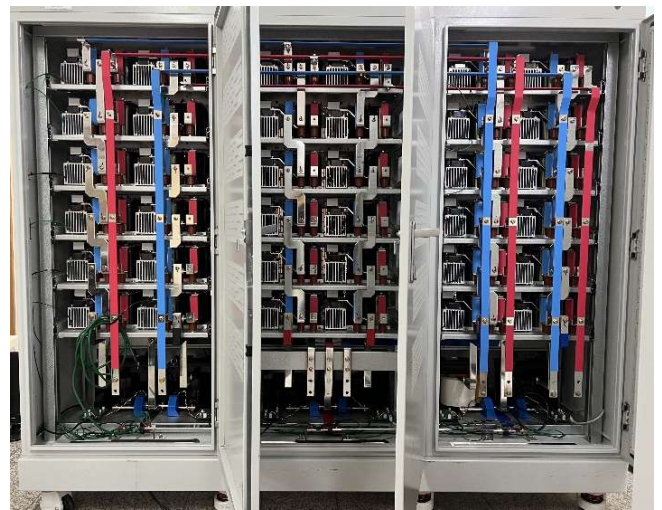


그림5 MMC 후면(파워부)

3. MMC 유도전동기 드라이브 실험 및 결과

3.1 실험 구성

제작한 MMC로 그림 6과 같이 유도전동기 구동 실험을 수행했다.

우선 440 V 발전기가 3상 전압을 만들어내고, Active Front End 컨버터가 이를 750 V DC 전압 레벨로 MMC의 DC 단 전압을 제어한다.

MMC는 AFE 컨버터가 제어하는 DC 단 전압을 사용하여 MMC 캐패시터 에너지 밸런싱 제어^[3], 유도전동기 벡터 제어 및 유도전동기 속도 제어를 수행하는데, 이때 C++ 프로그래밍으로 구현된 제어 알고리즘을 EtherCAT Master인 IPC가 Slave들이 보낸 서브모듈 전압 및 암전류 정보를 토대로 실시간 제어를 수행한다.

유도전동기 부하를 모의하기 위해 유도전동기와 커플링된 발전기 출력 단자에 연결된 Resistor Bank 값을 조정하면서 부하를 조절하였다.

실험에 사용된 유도전동기 제정수는 표 1과 같다.

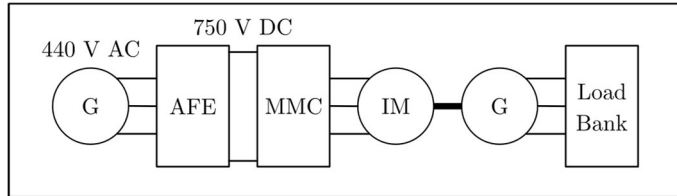


그림6 실험 구성도

정격 용량	400 kW	정격 전압	440 V
정격 전류	603.8 A	정격 속도	1780 rpm

표 1 유도 전동기 제정수

3.2 실험 결과

유도전동기 속도를 1500 rpm으로 속도 제어하고 있는 상황에서 부하를 110 kW로 점진적으로 증가시키며 전동기 A상 전류, MMC 출력 선간 전압 파형을 측정하였다. 110 kW 부하가 걸리고 난 후 모터가 정상 상태에 이르렀을 때 측정된 결과는 그림 7과 같다. 멀티레벨 컨버터 특성상 출력 선간 전압 파형이 정현파에 가까운 것을 볼 수 있으며, 모터 상전류 또한 깔끔하게 합성되는 것을 볼 수 있다.

해당 실험을 통해 전동기 부하가 큰 상황에서도 통신이 안정적으로 유지되며 IPC에서 수행되는 MMC 제어기 연산이 한 샘플링 주기 안에 정확하게 수행되는 것을 확인하였고, 이를 통해 제안된 제어 시스템의 통신 및 제어 성능을 검증하였다.

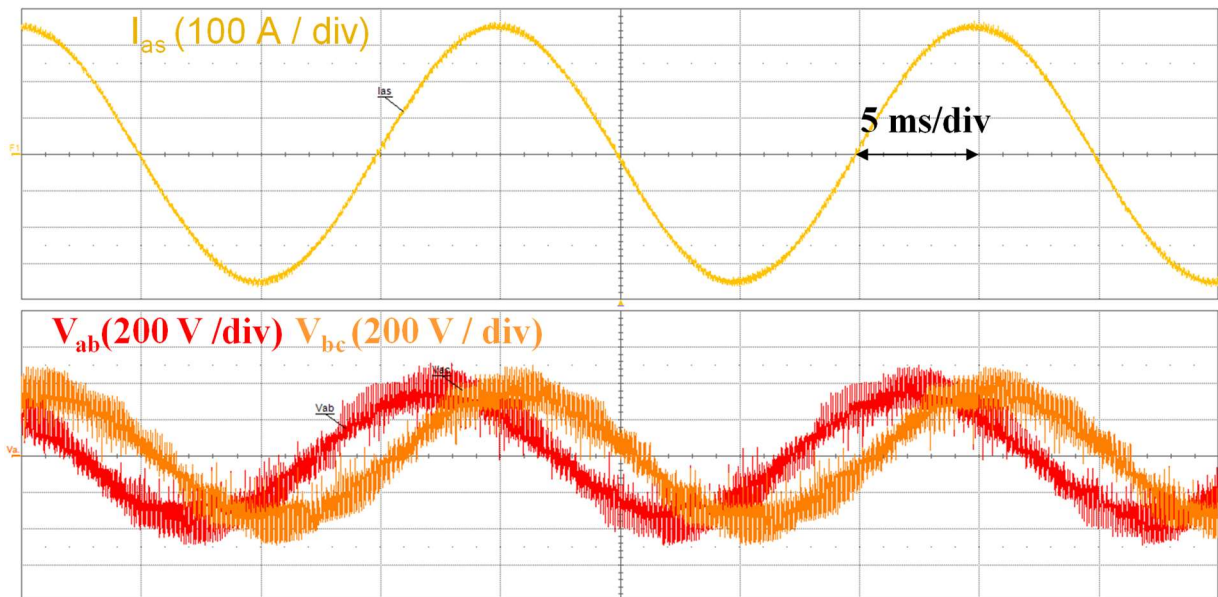


그림7 모터 상전류 및 MMC 출력 선간 전압 측정 파형

4. 결론

제안된 EtherCAT 통신 기반 MMC 제어 시스템을 완전히 검증하기 위해 Slave 40개로 시스템을 구성했을 때 통신으로 인한 디지털 시지연 측정 시 한 샘플링 주기로 디지털 시지연이 최소화되는 것을 확인하였다. 또한 해당 제어 시스템을 탑재한 MMC를 제작하여 유도전동기 구동 실험을 진행하였으며, 이를 통해 제안된 MMC 제어 시스템의 제어 성능을 확인하였고 실제적인 모듈형 컨버터에 해당 제어 시스템이 적용 가능하다는 것을 실험적으로 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] 박재연, 김동준, 최성희, 설승기, "EtherCAT 통신을 이용한 PC 기반의 실시간 제어 시스템 설계 및 구현" 전력전자학술대회 논문집 2013.11 (2022): 16-18.
- [2] 김동준, 박재연, 최성희, "EtherCAT 통신 기반 제어 시스템을 사용한 컨버터 병렬 제어" 전력전자학술대회 논문집 2013.11 (2022): 348-350.
- [3] S. Cui and S. -K. Sul, "A Comprehensive DC Short-Circuit Fault Ride Through Strategy of Hybrid Modular Multilevel Converters (MMCs) for Overhead Line Transmission," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 11, pp. 7780-7796, Nov. 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2513426.