

MMC 구조의 SST 제어를 위한 FSI 기반 통신 구조

홍지아*, 박화평*

*한국에너지공과대학교 차세대그리드

e-mail:hja1617@kentech.ac.kr

A FSI-Based Communication Architecture for Distributed MMC Type SST Control

Jia Hong*, Hwa-Pyeong Park*

*Grid Modernization, Korea Institute of Energy Technology

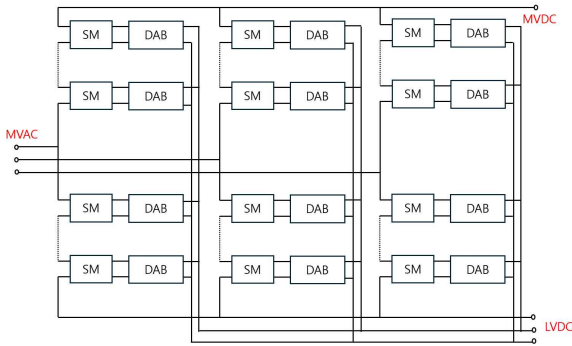
요약

MMC (Modular Multilevel converter) 기반 SST(Solid-State Transformer)는 제어 reference 분배 및 protection으로 인해 communication이 매우 중요하다. MV-scale SST는 Star의 fault isolation 이점을 활용할 수 있는 영역임에도 기존 연구는 Ring 기반 통신에 머물러 있다. 본 논문은 정상 시 Star, 단일 링크 고장 시 인접 SM 경우 Daisy 백업으로 자동 재구성되는 하이브리드 토폴로지와 FSI/CAN FD 이원화 프로토콜, 그리고 공진 제어기 기반 fault-tolerant transition 메커니즘을 제안한다. 정량 분석 결과 11-device loop의 통신 지연이 24.7 μ s로 20 kHz 제어 주기 내에 수렴함을 확인하였으며, 공진 제어기가 2000 cycle 동안 reference를 생성하여 오랜 지연시간이라도 SM 전압 밸런싱이 유지될 수 있음을 시뮬레이션을 통해 입증하였다.

1. 서론

분산 신재생 에너지, ESS, DC 부하가 증가하면서, 전통적 AC 배전이 아닌 DC 배전의 필요성이 급증하고 있다. 신재생 에너지 수요 증가와 더불어 EV 충전, 데이터센터 수요가 증가하면서 양방향 전력 흐름과 다중 전압 레벨에서의 DC 배전이 중요해지고 있다. 기존 50/60 Hz 변압기는 단순 절연 및 승압만 수행하고 능동 제어가 불가능하다는 한계를 지닌다. 전압 변동, 주파수 불안정 등 계통 사고 발생 시 즉각적 대응이 어려우며, 전력 품질 제어가 불가능하다. 기존 LFT (Low Frequency Transformer)는 AC 기반으로 AC에서 DC, DC에서 AC로의 단계 변환과정을 거치며 큰 전력 손실을 유발한다. 이에 SST (Solid State Transformer)는 양방향 전력 제어, 변압기의 부피 및 무게 경량화, 적은 전력 변환 단계를 거치며 MV/LV 다중 DC 포트를 단일 장비에서 제공한다는 점에서 MV/LV 하이브리드 AC/DC 배전의 핵심 전력변환 장치로 떠오르고 있다^[1]. 그림 1은 MMC (Modular Multilevel converter)와 DAB (Dual Active Bridge)가 통합된 전통적 DM²C-SST (DAB-based MMC-SST)를 나타낸다. 각 MMC의 SM (Submodule)마다 DAB가 연결된 표준 SST 구조로 직렬 입력과 병렬 출력의 특징

을 가진다. MMC는 보통 half-bridge나 full-bridge에 커패시터로 구성된 SM을 직렬로 쌓아 N+1레벨의 계단형 MV AC 파형을 합성한다. DAB는 각 SM로부터 절연된 LV DC 출력을 추출하고 양방향으로 전력 흐름을 가능하게 한다. DM²C-SST는 MMC로 추가적인 변압기 없이 직접 MV AC와 MV DC 변환을 모듈식으로 처리하고, 각 SM의 DAB가 분산된 절연 DC 포트를 N개 제공함으로써 다양한 전압 레벨의 DC 분산 배전이 가능하다^[2]. SM 수는 전압레벨에 의해 결정이 되는데, 시스템 전압이 증가할수록 직렬 SM 개수가 비례해서 증가한다. 매 제어 주기 모든 SM의 커패시터 전압, 암 전류, 온도, 고장 플래그를 수집하고 개별 게이트 명령을 분배해야 한다. 이로 인해 발생하는 제어기와 SM 간 정보 교환 부담이 MMC 기반 SST의 새로운 핵심 과제로 부상하고 있다.

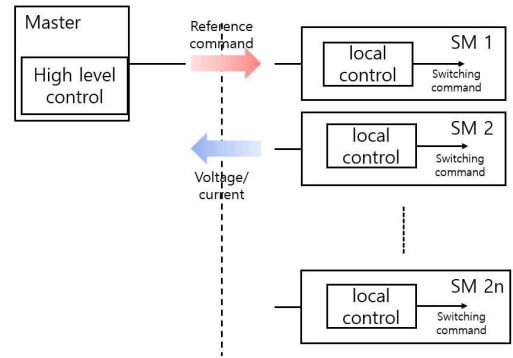


[그림 1] MMC 및 DAB 가 통합된 DM²C-SST

이러한 정보 교환 부담을 처리하는 전통적인 접근은 모든 SM을 단일 중앙 제어기에 직접 연결하여 글로벌 sorting과 PWM 생성을 일괄 수행하는 중앙집중 구조이다. 모든 측정, 제어, PWM 생성이 단일 컨트롤러에 집중되고, SM은 ADC와 게이트 드라이버만 가진 dummy node이다. 중앙 컨트롤러는 출력 전류와 전압 제어, SM 커패시터 전압 평균화, SM 커패시터 전압 밸런싱, 차동 전류 억제와 PWM 생성을 한다. 이러한 구조는 모든 SM 전압 정보를 바탕으로 글로벌 sorting을 하여 밸런싱의 정밀성을 높일 수 있다^[3]. 단일 클럭 도메인으로 동기화 문제가 자동으로 해결되고, 코드베이스 1개로서 펌웨어가 단순하다는 장점을 가진다. 하지만, SM 수 증가시 비선형 증가로 인한 연산 부담과 중앙 코드 수정이 필요해 모듈성 및 확장성이 제한된다. 중앙 제어기 고장 시, 전체 시스템이 정지될 수 있는 단일 고장점 문제와 대량의 데이터를 직렬 처리하거나 sorting하는 과정에서 연산 지연이 발생할 수 있는 한계가 존재한다. 그림 2에서, 분산 제어 구조는 제어 시스템을, 암, SM 단계로 나눠서 분리하며, 상위 제어기는 전체적인 전력 흐름만을 제어하고 하위 제어기에서 SM 전압 밸런싱과 같은 세부적 제어를 담당한다. 상위에서 통신을 할 때 전송되는 데이터가 감소하고 대역폭 요구사항이 현저히 낮아져 통신 부하가 대폭 감소한다. 일부 제어기가 고장 시 해당 클러스터만 격리하고 나머지 시스템은 운전 지속이 가능한 장점을 가진다. [4]에서는 feedforward 기반 평균 전압 제어를 통한 완전 분산 아키텍처를 제안하고, [5]에서는 sub-MMC의 대칭 설계로 암 전류 센서까지 제거하는 hardware-software co-design을 제시하였다. 이러한 알고리즘 및 토폴로지 차원의 분산화 연구들은 분산 제어 구조의 효용을 입증해왔다.

하지만 이러한 분산 제어를 물리적으로 구현하는 통신 인프라 연구가 많이 이루어져 있지 않다. 물리적 토폴로지로는 Star와 Daisy chain으로 나뉜다. Star 토폴로지는 각 SM으로 직접 광링크를 통해 노드당 지연과 단일 클럭 동기화를 보장한다. 그러나 광포트 수가 SM 수에 비례하다는 점과 Master차원에서의 단일 고장점의 문제를 가진다. Daisy chain은 케이블 수가 적고 노드당 누적 지연이 발생해 일정 SM 수 이상의 암에서 제어 주기를 초과할 수 있는 문제점이 있다. 단일 노드 고장이 하단 전체의

제어 불가능까지 야기한다는 한계를 지닌다. 프로토콜 차원에서 CAN 기반 통신은 비용 효율적이나 최대 1Mbps 대응으로 MMC cycle-by-cycle 제어에 부적절하다. 일반적인 통신 기법인 EtherCAT의 경우, 1Gbps까지 대응 가능하지만 스택의 비용이 노드 수에 비례하다는 단점이 존재한다. MV-scale SST는 Star의 fault isolation 이점을 활용할 수 있는 영역임에도 기존 연구는 Ring 기반 솔루션에 머물러 왔다.



[그림 2] MMC 기반 SST 분산제어구조.

본 연구에서는 분산 제어 MMC 기반 SST를 위한 FSI 기반 통신 아키텍처를 제안하고, 물리적 토폴로지 및 프로토콜 관점에서 하이브리드 솔루션을 제안한다. SST 기반 통신 시스템이 운영 모드에 따라 Star와 Daisy Chain을 다르게 운영하고자 한다. 정상상태에서는 Star 기반의 Tx-Rx를 운영하고 통신 고장시 Daisy Chain 기반 Tx-Rx를 운영하고자 한다. 이는 정상 시에는 Star의 결정적 지연 및 동기화 이점을 활용하고, 고장 시 해당 SM을 Daisy Chain으로 우회 경로를 활성화한다. 통신 프로토콜로는 FSI와 CAN FD를 통합한 이원화 통신 구조를 제안한다. Master에서 Slave로 통신시 FSI를 사용하여 고속 제어를 가능하게 하고, Slave에서 Master로 향할 때는 CAN FD를 적용해 상태 및 진단 피드백을 하고자 하였다. 이는 CAN의 저속 한계를 고려해 진단용으로 사용하고, EtherCAT의 고비용 부담을 해결한다. 또한, 본 논문에서는 제안 구조가 20 kHz cycle (50 μs)내에 동작 가능함을 수식으로 분석하여 증명한다. 더 나아가, 통신 고장 발생 시 Star에서 Daisy로 전환 과정 간 Fault Tolerance 제어기를 구현하고자 한다. 공진 제어기를 활용하여 통신 전환 과정 간 지연시간 동안 정상 상태의 reference 신호를 생성하여 MMC 작동을 중단하지 않고 시스템 dynamic 재구성을 관리하고자 하였다.

2. 본론

MMC 기반 SST spec 파라미터는 표 1과 같으며, SM 구조는 full bridge에 DAB가 연결된 구조이다. 분산 제어 구조를 사용하여 상위 제어기 1개와 하위 제어기 1개로 나누어 MMC 기반

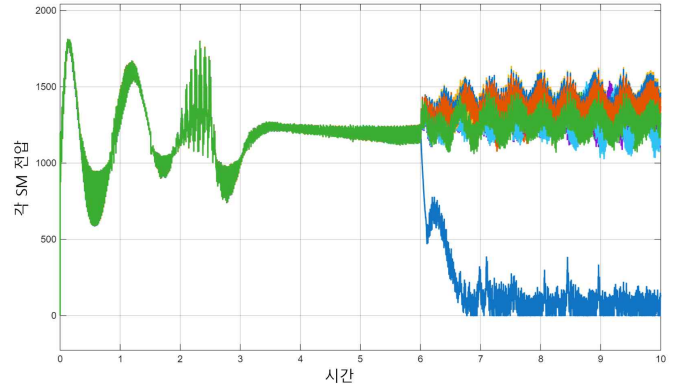
SST를 제어한다. 상위 제어기에서는 계통 전압, 전류 제어, DC link 전압 제어, dq 변환을 해서 얻은 전류, 전압으로부터 레퍼런스 전압을 출력하고, 암 전류를 측정하여 순환전류의 제 2 고조파를 제거하는 상별 전압을 출력한다. 하위 제어기에서는 상위 제어기로부터 레퍼런스 전압과 상 별 순환전류의 제 2 고조파를 제거하는 전압 값을 전달 받는다. 추가적으로 상 별 각 암의 전류 방향, 각 SM 커패시터 전압 지령치를 생성, SM 전압 밸런싱, 각 SM 커패시터 전압을 측정하고, DAB 출력 레퍼런스 전압 생성 및 DAB PWM을 하위 제어기에서 처리한다. 상위 제어기에서 하위 제어기로의 통신 지연과 각 제어기에서의 통신 속도는 20 kHz (50 μ s)로 설정하였다.

통신 토폴로지로는 정상 운영 모드에서는 Star이 적용된다. Master의 Tx에서 각 Slave의 Rx로 1:N 방식으로 통신하고, Master의 Rx로 각 Slave의 Tx로부터 피드백 통신이 이루어진다. 고장 운영 모드에서는 Daisy Chain이 적용되어, 각 SM의 물리적 인접 SM과의 추가 광링크는 양방향 연결로 구성된다. 프로토콜로는 FSI와 CAN FD를 사용하는데, FSI가 50 MBaud 대역폭을 가지고 Star과 Daisy Chain이 비용, 결정성 및 절연 측면에서 둘 다 가능하다는 점에서 이를 선정하였다. Slave에서의 진단 정보 통신은 cycle-by-cycle이 불필요하다는 점에서 CAN FD 채널을 선택하였다. FSI 기반 Daisy Chain 통신의 누적 지연 특성을 분석해보면, 3-device 기준 loop 지연은 8-word 패킷에서 약 6.3 μ s, 16-word 패킷에서 약 10.65 μ s로 측정되며 노드를 하나 추가할때마다 각각 약 2.3 μ s와 3.75 μ s가 누적된다. 이를 기준으로 상위 1대와 SM 10대로 구성된 11-device loop 지연을 산정하면 8-word 기준 약 24.7 μ s, 16-word 기준 약 40.65 μ s로, 모두 20 kHz 제어 주기에 해당하는 50 μ s 이내에 수렴한다. 따라서 본 통신 구조는 cycle-by-cycle 제어 요구사항을 만족함을 정량적으로 확인할 수 있다.

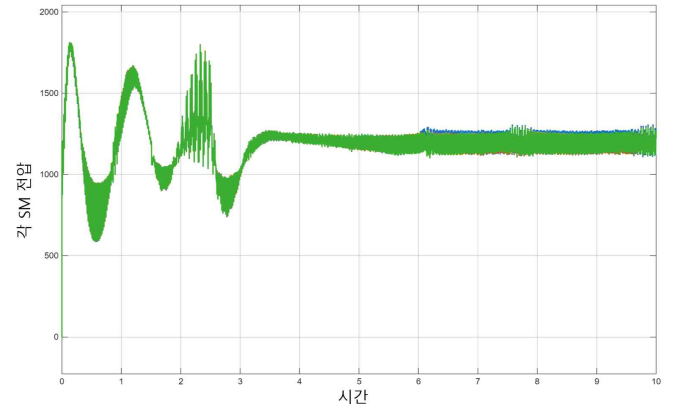
Star 통신 고장 시점부터 Daisy Chain 백업이 활성화되기까지의 짧은 단절 구간 동안에도 SM은 PWM 동작을 지속해야 하므로, 이 구간을 위한 reference 신호 생성이 필수적이다. 본 연구에서는 공진 제어기를 통해 이를 해결한다. 공진 제어기는 60 Hz 기본파와 120 Hz 2차 고조파에 동조되어, 정상 운영 시 상위 reference에 lock-in 되어 위상과 크기 정보를 내부 상태로 누적한다. 통신 단절이 검출되면 공진 제어기는 마지막 lock-in 상태를 출발점으로 동일 주파수의 정현파를 자체 재생하여 SM의 PWM reference로 공급하며, 이로써 단절 구간 동안에도 MMC 출력이 연속성을 유지한다. Daisy 백업 경로가 복구되면 인접 SM에서 reference를 받아 통신 전환이 무중단으로 완료된다. 그림 3 (a)는 특정 SM이 상위 제어기로부터 통신이 끊어졌을 경우를, 그림 3 (b)는

[표 1] MMC 기반 SST 사양

정격 선간전압	22.9k/3 V	정격 주파수	60 Hz
정격 용량	500 kVA	정격 DC 전압	13.2 kV
암 당 SM 수	11	스위칭 주파수	20 kHz



(a)



(b)

[그림 3] SM 전압 밸런싱 시뮬레이션 결과 (a) 통신 고장 시 (b) Star-Daisy Chain과 통신 지연 동안 공진 제어기의 가상 레퍼런스 생성 시

Star에서 Daisy Chain으로 전환 및 100 ms 지연시간 동안의 공진 제어기로부터 가상 reference를 받은 전체 SM의 전압 밸런싱을 나타낸다. 공진 제어기가 2000 cycle 동안 reference를 생성하여 오랜 지연시간이라도 SM 전압 밸런싱이 유지될 수 있음을 시뮬레이션을 통해 입증하였다.

3. 결론

본 논문은 분산 제어 MMC 기반 SST를 위한 재구성 가능 FSI 기반 통신·동기화 아키텍처를 제안하였다. 정상 시 Star, 고장 시 인접 SM 경우 Daisy 백업으로 자동 재구성되는 하이브리드 토폴로지를 통해 결정적 지연과 single-fault tolerance를 동시에 확보하였다. FSI와 CAN FD의 이원화 프로토콜 구조로 EtherCAT 수준의 비용 부

담 없이 cycle-by-cycle 통신을 실현하였다. 누적 지연 모델을 정식화하여 11-device loop가 24.7 μs (8-word 기준)로 20 kHz 제어 주기 내에 수렴함을 증명하였다. 모드 전환 구간의 reference 단절을 공진 제어기 기반 자체 재생으로 보간하여 MMC 출력의 무중단 동작을 보장하였다. 본 연구는 분산 제어 알고리즘 연구가 추상화해 온 통신 매체를 MV-scale SST 환경에서 실제 구현 가능한 형태로 구체화하였다는 데 의의를 갖는다.

참고문헌

- [1] G. Zheng, Y. Chen, and Y. Kang, "Modeling and control of the modular multilevel converter (MMC) based solid state transformer (SST) with magnetic integration," *CES Trans. Electr. Mach. Syst.*, vol. 4, no. 4, pp. 310-317, Dec. 2020.
- [2] J. Teng, X. Sun, Y. Pan, X. Liu, Y. Zhang, W. Zhao, and X. Li, "An inductive-filtering strategy of submodule ripple-power in triple-port MMC-based SST applied to hybrid medium and low voltage AC/DC interface," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 37, no. 7, pp. 8015-8032, Jul. 2022.
- [3] M. Hagiwara and H. Akagi, "Control and experiment of pulsewidth-modulated modular multilevel converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 7, pp. 1737-1746, Jul. 2009.
- [4] S. Yang, Y. Tang, and P. Wang, "Distributed control for a modular multilevel converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 7, pp. 5578-5591, Jul. 2018.
- [5] S. Farzamkia, M. Zhang, H. Zou, A. Vetrivelan, and A. Q. Huang, "MMC based solid state transformer for large-scale distributed PV integration and medium voltage AC/DC interconnection," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 39, no. 4, pp. 2495-2506, Aug. 2024.