

MMC 서브모듈 테스트를 위한 Power-HILS 검증 플랫폼

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

Development of Power-HILS Verification Platform for MMC Submodule Testing

Seung-Yong Lee*, Dongjoon Kim**, Jaeyeon Park**, Shenghui Cui**, Jae-Jung Jung*
 Kyungpook National University*, Seoul Ndcational University**

ABSTRACT

전력변환을 위한 모듈형 멀티레벨 컨버터(MMC)의 개발 측면에서 컨버터의 제어와 하드웨어의 신뢰성 검증은 설치 및 운영 전에 필수적으로 수행되어야 한다. 최근 Hardware In a Loop Simulation(HILS)을 이용한 검증 절차의 선행이 요구되고 있으며, 동시에 관련한 많은 연구들이 진행되고 있다. 이러한 시스템은 실시간의 실제 MMC의 운영 시퀀스를 반영하여 시스템을 통합적으로 검증할 수 있다는 장점을 가진다. 본 논문에서는 MMC의 서브모듈 테스트 시 실제 서브모듈 하드웨어를 실시간 시뮬레이션 루프에 추가하여 검증을 진행할 수 있는 Power-HILS (PHILS) 구성을 제안한다. 또한, PHILS 구성을 이용한 서브모듈 테스트를 위해 MMC의 암 전류를 모사할 수 있는 전력변환장치와 MMC의 암 전류 모사를 위한 제어 방법 또한 제안한다. 제안하는 구성 방법은 MMC의 모터구동을 위한 운전 상황을 가정하여 검증하였다.

1. 서론

모듈형 멀티레벨 컨버터(MMC)는 중·고전압 및 대전력 분야에서 효과적인 방법으로 채택되는 회로 구성들 중 하나이다. 특히 모듈형 구조로 인한 합성 전압의 크기와 레벨의 쉬운 확장이 가능하므로 전기추진선박의 추진용 모터 드라이브 시스템에 적용하려는 시도와 관련 연구가 활발히 진행되고 있다^[1].

MMC는 모듈형 구조로 하프 브리지 또는 풀 브리지로 구성된 서브모듈을 직렬 연결하여 회로가 설계된다. 따라서 MMC 회로 구성 시 서브모듈의 양산제작은 필수적이며 양산을 위해 신뢰성 검증이 철저히 이루어져야 한다. 또한 모듈형으로 이루어진 시스템의 특성상 제어를 구성하는 통신시스템, 제어기 등의 검증 또한 필요하다.

제어기의 검증을 위해서는 일반적으로 Hardware In a Loop Simulation(HILS)을 이용한다. 이를 통해 MMC 회로구성을 실시간 시뮬레이션 내에 구현하여 제어기의 입출력, 내부 제어 알고리즘 등을 검증할 수 있으나, 서브모듈의 검증도 제어알고리즘과 연계하여 이루어져야 한다. 따라서, 이러한 서브모듈의 검증을 위한 여러 방안이 지속적으로 연구되어 왔다^[2]. 하지만 기존의 다수 연구들은 MMC의 실제 운영 시퀀스를 반영한 조건하에서 서브모듈을 검증하는 데는 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 MMC의 제어 조건을 적용하여 서브모듈을 검증할 수 있는 Power-HILS(PHILS) 개념을 적용한 서브모듈 테스트 방법을 제안한다.

PHILS 구성은 HILS 내에 검증 예정인 하드웨어를 포함시켜 시험 환경을 구성하는 HILS의 확장된 개념이다^[3]. 제안하는

구성에서는 MMC의 실제 서브모듈 중 한 개의 서브모듈의 실제 하드웨어를 HILS에 포함시켜 PHILS를 구현한다. 이 과정에서 서브모듈의 테스트를 위해 실시간 시뮬레이션에서 연산된 MMC의 전류를 모의해주어야 하므로 이러한 MMC의 전류를 모사할 수 있는 회로 구성 및 제어 방안 또한 함께 제안된다. 제안하는 PHILS 구성을 이용한 MMC 서브모듈 테스트 방법은 축소 스케일 실험을 통해 검증하였다.

2. MMC 서브모듈 검증을 위한 PHILS 구성 방법

2.1 전체적인 PHILS 검증 플랫폼 구성

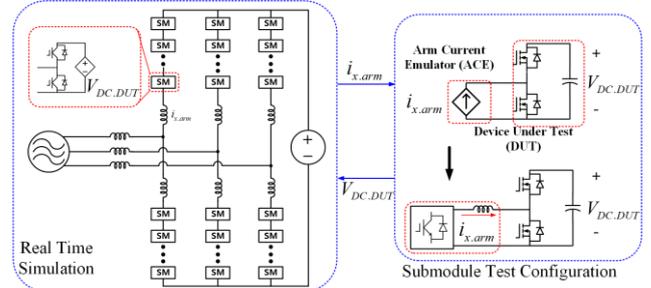


그림 1 PHILS 기반 서브모듈 테스트를 위한 MMC 회로 구성

그림 1은 서브모듈 테스트를 위한 PHILS 전체 구성을 나타낸다. MMC의 직렬 연결된 서브모듈 중 하나를 시험 대상(Device Under Test: DUT)으로 선정한다. 실시간 시뮬레이션 내부에 구현되는 MMC 회로 중 DUT로 선정된 서브모듈 부분은 DC단 커패시터 대신 HILS 회로의 중속 전압원으로 모델링 되어, 실제 DUT의 커패시터의 센싱된 전압을 신호 레벨로 변경하여 인가 받도록 구성한다.

실제 시험 대상이 되는 DUT는 실시간 시뮬레이션 내의 DUT에 인가되는 게이트 신호를 복제하여 시뮬레이션 내부의 DUT와 똑같은 스위칭 동작을 하도록 구성한다. 이 때 암 전류와 스위칭 동작에 따른 서브모듈 커패시터의 전압 유지를 확인하기 위해서는 암 전류를 모사하여 DUT에 인가해주어야 한다. 따라서 암 전류 모사를 위한 추가적인 회로가 필요하며 본 논문에서는 이를 전력반도체스위치 기반의 회로로 구성하여 암 전류 모사 장치(Arm Current Emulator: ACE)라 명칭한다. 전술한 바와 같이, ACE로 출력되는 암 전류와 DUT의 스위칭 동작에 의해 결정된 커패시터 전압 값은 실시간 시뮬레이션의 DUT의 중속 전압원으로 인가된다. 따라서 제안하는 PHILS 구성은 MMC의 제어 알고리즘에 따른 실시간 시뮬레이션의 동작은 시험 대상으로 만들어진 DUT가 정상적으로 동작할 때 서브모듈의 커패시터 전압 등을 그대로 제어에 이용하므로 제어 알고리즘의 검증과 더불어 서브모듈의 검증 또한 함께 진행을

하게 되는 구조이다. 그러나 이러한 PHILS 구성은 ACE가 암 전류를 모의하는 정확성이 높음이 전제되어야 하며, 이를 위한 고성능의 전력변환회로가 필요하다.

2.2 Arm Current Emulator(ACE) 회로 구성

본 논문에서 제안하는 ACE의 회로는 다음 3가지 조건이 충족되어야 한다. 1) 4상한 운전이 가능하여 암 전류의 방향에 관계없이 DUT에 전력 공급이 가능하여야 한다. 2) DUT의 DC전압 보다 높은 전압을 합성할 수 있어야 하며 일정 크기의 음의 전압도 합성할 수 있어야 하므로 이를 고려한 충분한 전압 마진이 필요하다. 3) 출력 전류를 추종하는 능력이 뛰어나야 하므로 높은 대역폭을 가지는 제어성을 요한다.

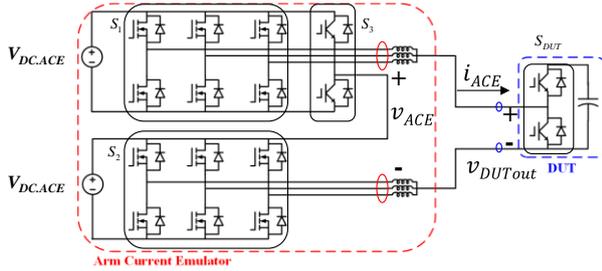


그림 2 제안하는 Arm Current Emulator(ACE) 회로 구성

위 3가지 조건을 만족하기 위해 본 논문에서는 그림 2와 같은 회로를 제안하여 적용한다. 각 스위치의 동작을 S_1, S_2, S_3 의 1,0으로 나타냈을 때 출력 가능한 상태는 표 1과 같이 8가지로 정의된다.

표 1 Arm Current Emulator의 스위칭 상태와 출력 전압

State	v_{ACE}	S_1	S_2	S_3
1	$V_{DC,ACE}$	0	0	0
2	$2V_{DC,ACE}$	1	0	0
3	$V_{DC,ACE}$	1	1	0
4	0	0	1	0
5	0	0	0	1
6	$V_{DC,ACE}$	1	0	1
7	$-V_{DC,ACE}$	0	1	1
8	0	1	1	1

첫번째 조건을 만족하기 위하여 전류를 양의 방향으로 출력할 수 있는 스위치 소자를 이용하며 그림 2의 S_3 스위치를 이용하여 ACE 출력 전압의 양전압/음전압을 상호 전환할 수 있다. 또한 DC 전압을 합성할 수 있는 레벨이 최대 $2V_{DC,ACE}$ 로 DUT의 DC 전압보다 높은 범위의 출력 전압 합성을 낮은 전압 정격의 스위치로 비교적 간단하게 합성할 수 있으므로 두번째 조건도 만족할 수 있다. 세번째 조건을 만족시키기 위해 S_1 과 S_2 스위치는 고전류에서도 고속 스위칭이 가능한 SiC MOSFET 소자를 이용하며 S_3 스위치는 오직 극성 변환을 위한 스위칭 동작만을 실행하므로 고속 스위칭이 요구되지 않으며 DUT의 회로를 활용할 수 있다. 또한 충분한 전류 용량을 얻기 위해 SiC MOSFET은 병렬 연결하여 회로를 구성한다.

3. MMC PHILS 구성 시 Arm Current Emulator 제어 방법

ACE의 제어는 제안하는 PHILS 구성에서 매우 중요한

요소이다. 실시간 시뮬레이션에서 연산된 MMC의 암 전류를 정확하게 모의하여 MMC 운전 조건에서 DUT를 검증할 수 있어야 한다. 이를 위하여 ACE의 제어는 그림 3과 같은 제어 방법을 적용한다.

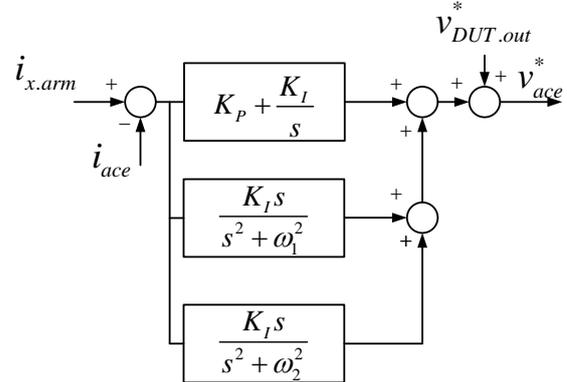


그림 3 Arm Current Emulator(ACE) 제어 구성

MMC의 암 전류는 DC 성분, 출력 전류의 기본파 주파수 성분, 모터 드라이브 적용시에는 저속 운전에서 에너지 균형 제어를 위한 고주파 주입 전류로 이루어져 있다^[4]. 따라서 ACE의 제어는 암 전류를 모사하기 위해 DC 성분 제어를 위한 비례적분(PI) 제어, 출력 전류의 기본파 주파수 대역(ω_1) 및 고주파 주입 전류의 주파수 대역(ω_2) 제어를 위한 공진제어기로 구성된다. 이 때 MMC의 서브모듈의 스위칭 상태는 MMC의 변조 방법 등에 의해 결정되는데, 일반적으로 많이 사용되는 정렬(sorting) 방식을 이용한 밸런싱과 level-shifted PWM을 통해 출력 전압을 합성할 경우 그 출력은 비선형적인 특성을 보인다. 따라서 ACE의 제어 성능을 높이기 위해 DUT의 출력전압은 반드시 전압보상 되어야 한다. 이러한 전압 보상을 구현하기 위해서는 DUT의 스위칭 주파수 보다 더 높은 주파수로 출력 전압을 센싱 및 제어에 이용하여야 한다.

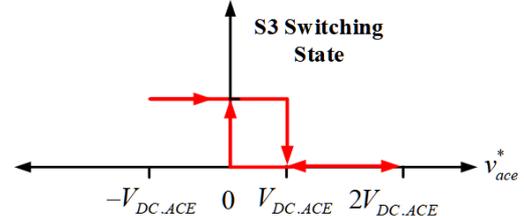


그림 4 Arm Current Emulator(ACE) 제어 구성

또한, ACE의 전압 합성 시 2장에서 언급하였듯, S_3 의 스위칭 동작을 통해 출력 전압의 극성을 전환한다. 그러나 지령 전압의 0점을 기준으로 극성 변환 시 외란에 민감하게 반응하여 S_3 의 의도치 않은 스위칭 동작이 발생할 수 있다. 이를 보완하기 위하여 본 논문에서는 S_3 의 스위칭 동작에 그림 4와 같이 히스테리시스 동작을 적용한다. 표 1의 스위칭 상태를 기준으로 S_3 가 1일 때에도 6번 상태와 같이 양 전압을 합성할 수 있다. 따라서 $V_{DC,ACE}$ 보다 큰 전압이 필요할 경우 2번 상태의 스위칭 조합이 가능하도록 S_3 가 스위칭 상태를 변경한다. 이후 양전압 합성은 S_3 가 0인 상태에서도 가능하므로 음전압 합성이 필요한 경우에만 스위치가 동작한다.

4. MMC PHILS 구성 검증

본 논문에서 제안하는 서브모듈 테스트 환경을 검증하기 위해 PHILS 실험 구성을 축소스케일 실험 세트에 검증하였다. 검증에 이용한 시뮬레이터는 OPAL-RT/실험 세트 구성 시

제어 시스템의 통신은 EtherCAT으로 구현하였다. 실험은 MMC의 모터드라이브 상황을 가정하여 진행하였으며 PHILS 구성에서 전력이 필요한 부분은 실시간 시뮬레이션에서 연산되는 값의 1/20으로 축소하여 실험을 진행하였다. MMC의 회로 파라미터, ACE의 회로 파라미터를 자세한 실험 파라미터는 표 2, 표 3과 같다.

표 2 MMC 주요 파라미터

DC Voltage	750[V]
No. of Submodule per Arm	6 [ea]
Inductance of Arm	128 [μ H]
Capacitance of Submodule	11.2[mF]
Rated Power of MMC	200 [kW]
Switching Frequency of Submodule	5 [kHz]

표 3 Arm Current Emulator 주요 파라미터

ACE DC Voltage	50[V]
ACE Equivalent Inductance	1.5[mH]
Switching Frequency of S_1, S_2	10 [kHz]

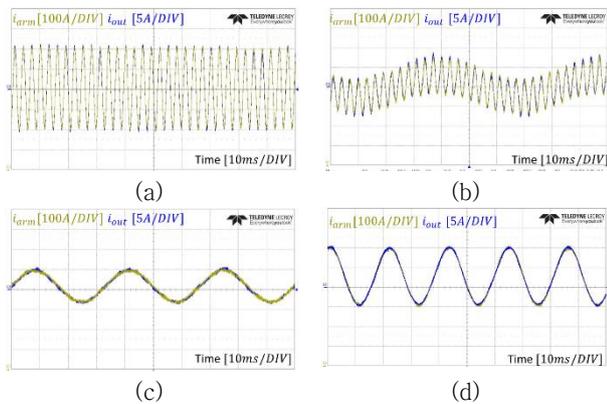


그림 5 PHILS 실험 결과: ACE 출력 전류 및 MMC 암 전류. (a)MMC 출력 주파수 0Hz, (b)MMC 출력 주파수 10Hz, (c)MMC 출력 주파수 30Hz, (d)MMC 출력 주파수 50Hz

MMC의 모터드라이브 상황을 가정하여 제어를 진행할 때, 저속에서 에너지 균형 제어를 위한 주입 주파수는 333Hz가 이용되었다. 그림 5는 PHILS 실험 결과로 ACE의 전류 합성 능력을 보여준다. 그림 5(a)는 모터가 정지한 상태로 333Hz의 주파수만 합성하고 있으며 그림 5(b)는 저속 운전 상황으로 운전주파수와 균형제어 유지를 위한 333Hz의 주파수가 동시에 나타난다. 그림 5(c),(d)는 고속에서의 운전 조건으로 기본파 주파수 및 DC 전류가 동시에 나타난다. 실험 결과로 전반적으로 ACE의 제어 성능이 MMC의 암 전류를 추종할 수 있음을 확인 할 수 있다.

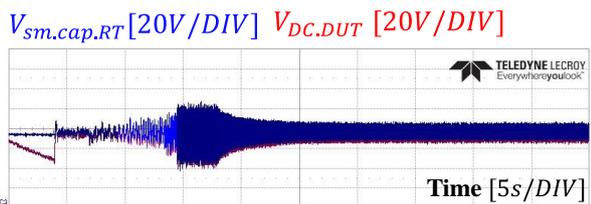


그림 6 DUT 전압 및 실시간 시뮬레이션 내 서브모듈 전압 비교

그림 6은 실제 DUT의 DC 전압을 스케일 조정하여 실시간 시뮬레이션 내의 DUT에 인가하여, 시뮬레이션 내 DUT 전압과 DUT와 같은 압에 있는 다른 서브모듈의 전압을 비교한 결과이다. 실험결과는 정지상태에서 50Hz까지 가속하는 상황에서의 서브모듈 DC 전압을 나타낸다. ACE의 전류 제어가 설계 의도와 같이 동작하면서 실제 DUT의 전압의 경향 또한 MMC 회로 내의 다른 서브모듈과 차이가 없음을 확인할 수 있다. 따라서 제안하는 PHILS 구성이 서브모듈 시험에 적합함을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 MMC의 서브모듈 테스트를 위한 새로운 구성인 PHILS 구성 방법 및 구현 방법을 제안하였다. 제안하는 PHILS 구성을 위해 실시간 시뮬레이션과 실제 하드웨어간 연계가 필요하며 이 때 DUT 시험을 위해서는 MMC의 암 전류를 모사할 수 있는 추가적인 회로가 필요하다. 이러한 회로는 전력변환장치로 설계될 수 있으며 실제 MMC의 암 전류가 포함하는 주파수 대역 성분들을 제어할 수 있도록 비례분공진 제어를 이용한다. 제안하는 시험 구성은 실시간 시뮬레이션과 MMC 축소 실험 세트를 통해 MMC의 모터드라이브 운전조건을 모의하여 검증되었으며 MMC의 제어기 및 서브모듈 하드웨어의 신뢰성을 검증하기 위해 적합한 구성임을 확인하였다.

이 논문은 HD한국조선해양의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] D. Ronanki and S. S. Williamson, "Modular Multilevel Converters for Transportation Electrification: Challenges and Opportunities," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 4, no. 2, pp. 399-407, June 2018.
- [2] Y. Tang, L. Ran, O. Alatisse and P. Mawby, "A Model Assisted Testing Scheme for Modular Multilevel Converter," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 1, pp. 165-176, Jan. 2016.
- [3] M. Steurer, C. S. Edrington, M. Sloderbeck, W. Ren and J. Langston, "A Megawatt-Scale Power Hardware-in-the-Loop Simulation Setup for Motor Drives," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 4, pp. 1254-1260, April 2010.
- [4] S. -Y. Lee, S. Cui and J. -J. Jung, "Enhanced Voltage Injection Control for Capacitor Voltage Balancing of MMC Under Low-Frequency Operation," 2023 11th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2023 - ECCE Asia), Jeju Island, Korea, Republic of, 2023, pp. 2643-2648,