

가변 주파수 운전 MMC의 서브모듈 개방회로 사고 진단 방법

이승용 정재정
경북대학교

Diagnosis Method for MMC Submodule Open Circuit Fault in Variable Frequency Drive

Seung-Yong Lee, Jae-Jung Jung
Kyungpook National University

ABSTRACT

모듈형 멀티레벨 컨버터(MMC)는 여러 개의 서브모듈이 직렬 연결된 구조로 개별 서브모듈의 사고 발생 시에도 사고 모듈을 바이패스 시켜 운전을 지속할 수 있는 신뢰도 높은 회로 구성이다. 서브모듈의 대표적인 사고 양상은 모듈 스위치 단락 또는 개방 회로 사고이며, 사고 발생 시 사고 파급을 방지하기 위해 서브모듈의 사고 지점 및 종류를 신속히 판단하여 바이패스를 할 수 있어야 한다. 단락회로 사고가 발생할 경우 일반적으로 스위치의 게이트 드라이버에서 고장을 진단할 수 있지만, 개방회로 사고의 경우 별도의 사고 감지 방안이 회로에 적용되어야 사고를 진단할 수 있다. 본 논문에서는 관측기를 이용하여 서브모듈의 전압을 추정하고, 추정치를 실제 전압과 비교하여 개방회로 사고를 진단할 수 있는 방법을 제안한다. 제안하는 개방회로 사고 진단 방법은 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서론

모듈형 멀티레벨 컨버터(MMC)는 대용량 전력 변환 및 제어 시스템에서 중요한 역할을 하고 있다. 이러한 MMC는 여러 개의 서브모듈이 직렬로 연결된 구조를 가지고 있어, 개별 서브모듈에 문제가 발생하더라도 서브모듈을 바이패스 시켜 시스템을 지속하여 운전할 수 있는 높은 신뢰성과 안전성을 장점으로 가진다. 이러한 MMC만의 장점으로 인해 최근 모터드라이브 시스템에 MMC 회로를 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다^[1]. 하지만 서브모듈 사고 발생 시 바이패스를 시키기 위해서는 사고 지점의 서브모듈을 정확히 식별하여야 하며 사고 종류를 판별할 수 있어야 한다.

MMC의 서브모듈 사고는 서브모듈 내 스위치의 단락사고 또는 개방회로 사고, 두 종류로 구분할 수 있다. 일반적으로 단락사고의 경우 서브모듈을 구성하는 하드웨어 요소 중 게이트 드라이버에서 사고를 감지할 수 있으며, 사고 지점을 신속히 판단할 수 있다. 그러나 개방회로 사고가 발생할 경우 별도의 진단 방법이 없을 경우 사고 지점을 판별할 수 없다. 이러한 문제에 대한 해결 방법은 꾸준히 지속되어 왔다[2]. 하지만 기존의 다수 연구들은 MMC의 모터드라이브 등 가변 주파수 운전 상황에서의 개방회로 사고 진단 방안을 상정하지 않은 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 MMC의 가변 주파수 운전 시 개별 서브모듈의 개방회로 사고를 진단할 수 있는 방법을 제안한다.

MMC의 개방회로 사고를 신속히 진단하기 위해 관측기를 이용하여 서브모듈의 전압을 추정하고, 이를 실제 전압과 비교하여 개방 회로 문제를 식별하는 방법을 제안한다. 이 때, MMC의 저주파 운전 시 나타날 수 있는 사고 진단의 어려운 점을 해결할 수 있는 방안도 제시된다. 제안하는 개방회로 사고

진단 방법은 시뮬레이션을 통해 검증한다.

2. MMC 서브모듈 개방회로 사고 특성

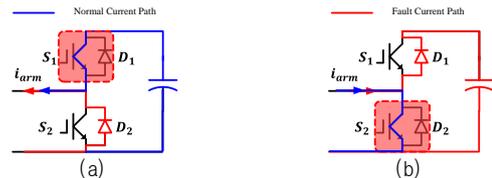


그림 1 서브모듈 개방회로 사고 시 전류 경로. (a) 상단 스위치 개방 회로 발생 시, (b) 하단 스위치 개방 회로 발생 시

그림 1은 MMC의 서브모듈 개방 회로 사고 발생 시 서브모듈을 도통하는 암 전류의 경로를 나타낸다. 스위치가 정상일 경우 전류는 스위치를 통해 도통할 수 있지만, 스위치의 개방회로 사고가 발생할 경우 전류는 다이오드를 통해서만 도통된다. 그림 1(a)는 서브모듈의 상단 스위치(S_1)에 개방회로 사고가 발생하였을 때를 나타낸다. 정상적인 경우 암 전류가 음의 방향일 때 S_1 동작 시 커패시터를 방전하는 방향으로 전류가 도통하여야 하지만, 사고 발생 시 스위치를 통해 도통하지 못하여 하단의 D_2 를 통해 암 전류가 도통한다. 그림 2(b)는 서브모듈의 하단 스위치(S_2)에 개방회로 사고가 발생한 경우이다. 암 전류가 음의 방향으로 MMC를 도통 중일 때 S_2 동작 시 서브모듈을 바이패스 시켜야 하지만, S_2 개방회로 사고로 인해 D_1 을 통해 커패시터가 충전되는 방향으로 전류가 도통한다.

3. MMC 서브모듈 개방회로 사고 진단 방법

상·하단 스위치 사고 발생 시 공통적으로 나타나는 특성은 커패시터가 충전되는 경로의 전류가 지배적으로 나타나게 되며 이로 인해 커패시터의 전압이 증가하게 된다. S_1 사고 발생시 암 전류가 양의 방향일 때 D_1 을 통해 커패시터가 충전되며, 음의 방향일 때는 커패시터를 방전시키지 못한다. S_2 사고 발생 시 S_1 의 동작으로 커패시터의 방전 경로는 확보되지만, S_2 를 이용한 서브모듈의 바이패스가 불가능하므로 커패시터는 D_1 을 통해 도통한 사고전류로 충전된다. 서브모듈의 스위치 듀티비(D_{sm})과 암 전류의 크기와 방향을 이용하여 커패시터의 충·방전에 의한 전압 크기를 예측할 수 있으며 사고 발생 시 측정된 전압이 예측된 전압보다 큰 값을 가질 것이라고 예상할 수 있다. 이를 위한 전압 예측 방법을 수식으로 나타내면 (1)과 같다.

수식 (1)을 이산화(Discretization) 하면 수식 (2)로 나타낼 수 있으며, 이산화 변환 과정에서 적분은 사다리꼴 적분(Trapezoidal) 방법을 이용한다. 사다리꼴 적분은 이전 샘플의 결과와 현재 샘플의 결과의 평균을 적분에 이용하는 형태로 샘플링 주파수 대비 신호의 주파수가 높을 경우 전진

오일러법(Forward Euler Method) 방식에 비해 정밀한 적분 결과를 얻을 수 있다. 특히 본 논문에서 상정한 가변 주파수 운전 상황에서 MMC가 낮은 주파수로 운전 할 때 비교적 높은 주파수의 암전류가 에너지 균형 유지를 위해 이용된다^[3]. 따라서 정확한 예측을 위해서는 사다리꼴 적분 방식의 적용을 제안한다.

$$\Delta v_{sm} = \frac{1}{C_{sm}} \int D_{sm} i_{arm} dt \quad (1)$$

$$v_{sm}[k] = v_{sm}[k-1] + \frac{1}{C_{sm}} D_{sm}[k-1] (i_{arm}[k] + i_{arm}[k-1]) \frac{T_{samp}}{2} \quad (2)$$

정확한 전압 예측을 위해서는 커패시터의 제작 공차등을 고려하여 커패시턴스의 예측 또한 필요하다. 이는 수식 (3),(4)로 계산할 수 있다.

$$C_{sm} = \frac{\Delta Q}{\Delta v_{sm}} \quad (3)$$

$$\Delta Q = D_{sm}[k-1] (i_{arm}[k] + i_{arm}[k-1]) \frac{T_{samp}}{2} \quad (4)$$

정확한 전압 예측을 위해서는 커패시터의 제작 공차등을 고려하여 커패시턴스의 예측 또한 필요하다. 이는 수식 (3),(4)로 계산할 수 있다. 그리고 실제 서브모듈 전압(v_{sm})과 예측 서브모듈 전압(v'_{sm})의 차이를 수식 (5)로 정의한다.

$$\varepsilon(v_{sm}) = v_{sm} - v'_{sm} \quad (5)$$

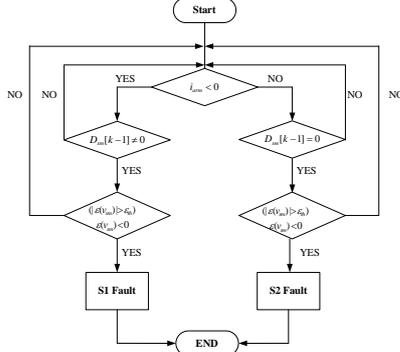


그림 2 서브모듈 개방회로 사고 진단 방법

개방회로 사고 진단방법은 서술하였듯이 실제 서브모듈 전압과 예측 서브모듈 전압의 차를 이용하여 그림 2와 같이 구성된다. 암 전류가 음이고, 서브모듈의 출력 듀티비가 0이 아닐 경우 예측 전압과 실제 전압의 차이가 설정한 기준(ε_{th}) 이상일 경우 s_1 스위치의 개방회로 사고로 진단할 수 있으며, 암 전류가 양이고 서브모듈의 출력 듀티비가 0일 때, 실제 전압과 예측 전압의 오차가 기준 이상일 경우 s_2 개방회로 사고로 판단할 수 있다.

4. MMC 서브모듈 개방회로 사고 진단 방법 검증

본 논문에서 제안하는 사고 진단 방법은 PLECS 시뮬레이션을 통해 검증하기 되었으며, 주요 회로 제정수는 표 1과 같다. 시뮬레이션은 모터 운전 시 저속에서의 사고 발생, 가속 중 사고 발생, 정속도에서의 사고 발생을 상정한다. 그림 3은 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 시뮬레이션 상황은 1초부터 5초까지 0Hz에서 60Hz까지 가속하며 시뮬레이션 상 2초에 MMC의 서브모듈 하나에 상단 스위치 사고, 하단 스위치 사고를 모의하였다. 제안하는 방법을 위해 저속(2초)에 사고를 모의하였고, 정속(6초)에도 사고를 모의하였다.

시뮬레이션 결과 서브모듈 사고 진단에 제안하는 방법을 적용할 경우 운전 주파수가 가변하여도 사고 발생 후 20ms내외로 사고를 진단할 수 있음을 확인할 수 있다.

표 1 MMC 시뮬레이션 주요 파라미터

DC Voltage	8000[V]
No. of Submodule per Arm	8[ea]
Inductance of Arm	360[μH]
Capacitance of Submodule	7.6[mF]
Rated Power of MMC	5[MW]
Switching Frequency of Submodule	5[kHz]

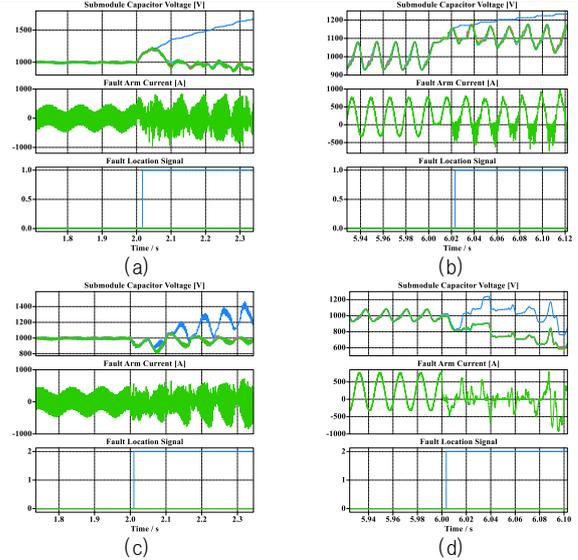


그림 3 시뮬레이션 결과 (a)MMC 저속 운전시 상단 스위치 사고 진단, (b) MMC 정속 운전시 상단 스위치 사고 진단, (c) MMC 저속 운전시 하단 스위치 사고 진단, (d) MMC 정속 운전시 하단 스위치 사고 진단

4. 결론

본 논문에서는 MMC의 가변 주파수 운전 시 서브모듈의 개방회로 사고 진단 방법을 제안하였다. 제안하는 방법은 사고 진단을 위하여 서브모듈의 커패시턴스 및 DC전압을 정밀하게 예측하여 실제 측정 전압과 예측 전압의 차를 고장 판단의 기준으로 이용한다. 제안하는 방법이 적절히 동작할 수 있음은 PLECS 시뮬레이션을 통해 검증되었고, 운전 주파수 대역과 무관하게 사고 직후 수십 밀리 초 내외로 사고가 진단되었음을 확인하였다.

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NO.2022R1A4A1031885)

참고 문헌

- [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. Fu, Z. Meng, X. Yang and L. Ji, "Open-Circuit Faults Localization With Error Elimination for Modular Multilevel Converters Under Various Control Modes," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 12, no. 2, pp. 2041–2051, April 2024,
- [3] 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,