

PSCAD/EMTDC를 이용한 MVDC용 보호협조기기의 모델링에 관한 연구

한병길*, 이후동*, 신진*, 곽충근*, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail: bghan@koreatech.ac.kr

A Study on Modeling of Protection Coordination Device for MVDC Based on PSCAD/EMTDC

Byeong-Gill Han*, Hu-Dong Lee*, Jian Shen*, Chung-Guen Kwak*, Dae-Seok Rho*

*Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약

방사형 MVDC 배전계통은 기존의 AC 배전계통의 방사형 구조에서 MVDC용 메인 컨버터(AC-DC)를 두어 간선에 DC 전력을 공급하고, 각 구간별로 선로가 분기되어 수용가 또는 분산전원에 연결된 형태이다. 그러나, MVDC 배전계통에서 고압 선로측 사고 시 메인 컨버터의 공급용량을 초과하는 사고전류가 발생할 경우, 메인 컨버터가 급격하게 탈락하여 보호협조가 어려운 문제점을 가지고 있다. 따라서, 본 논문에서는 메인컨버터의 탈락을 방지하기 위하여 사고전류를 제한하는 CLR을 이용한 MVDC용 보호협조방식을 제안한다. 여기서, 보호협조기기는 주 통전부, 환류부, 전류 제한부로 구성되고, 메인 컨버터가 탈락하기 전에 기기 내부의 CLR에 의해 보호협조시간차를 확보하여, 수용가측 보호기기가 먼저 동작하여 사고구간을 분리하도록 한다. 또한, PSCAD/EMTDC를 이용하여 MVDC용 보호협조기기와 모의 배전계통 모델링을 수행하고, 이를 바탕으로 보호협조기기의 동작 특성을 분석한 결과, 사고전류는 보호협조기기의 CLR에 의해 제한되어 메인컨버터의 탈락을 방지하고, 보호기기에 의해 사고구간을 안정적으로 분리할 수 있어 본 논문에서 제안한 보호협조기기가 유용함을 확인하였다.

1. 서론

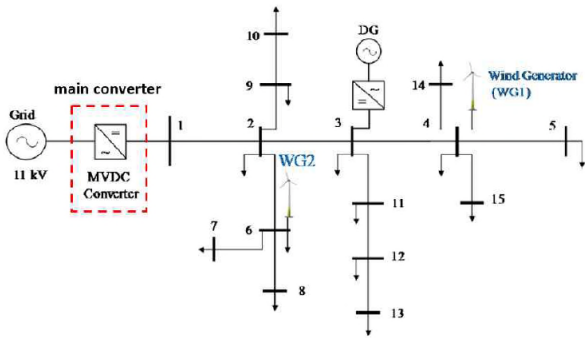
MVDC 기술을 활용한 배전계통은 운영자의 필요와 목적에 따라 다양하게 구성될 수 있는데, 일반적으로, 방사형(radial), 환상형(loop), 다중터미널(multi-terminal) 그리고 BTB(backto-back) 등의 형태로 구분된다[1]. 여기서, 방사형 구조는 국내의 AC 배전계통의 형태와 유사하며, 메인 컨버터 한 대로 용이하게 구현할 수 있는 장점이 있다. 하지만, MVDC 배전계통에서 고압 선로측 사고 시 메인 컨버터의 공급용량을 초과하는 사고전류가 발생할 경우, 컨버터가 급격하게 탈락하여 보호협조가 어려운 문제점을 가지고 있다[2]. 따라서, 본 논문에서는 메인컨버터의 탈락을 방지하기 위해, 사고전류를 제한할 수 있는 CLR을 이용한 MVDC용 보호협조기기를 제안한다. 즉, 제시한 보호협조기기는 주 통전부, 환류부, 전류 제한부로 구성되고, 메인 컨버터가 탈락하기 전에 기기 내부의 CLR에 의해 보호협조시간차를 확보하여, 보호기기가 사고구간을 분리할 수 있도록 한다. 또한, 보호협조기기의 환류부는 주통전부 및 전류 제한부의 스위치들을 영 전압 턴 온/오프로 동작 시키며, 전류 제한부는 환류부의 동일한 스위치 구조와 CLR을 직렬로 구성하여, 메인 컨버터의 전

류보호레벨 보다 낮은 전류로 제한하는 역할을 수행한다. 한편, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 MVDC용 보호협조기기와 모의 배전계통 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 보호협조기기의 동작 특성을 분석한 결과, 사고전류는 보호협조기기의 CLR에 의해 제한되어 메인컨버터의 탈락을 방지하고, 보호기기에 의해 사고구간을 안정적으로 분리할 수 있어 본 논문에서 제안한 보호협조기기가 유용함을 확인하였다.

2. 방사형 MVDC 배전계통의 특성분석

방사형 구조의 MVDC 배전계통은 그림 1과 같이 나타낼 수 있으며, 일반적인 방사형 AC 배전계통의 구조에서 MVDC용 메인 컨버터(AC-DC)를 두어 간선에 DC 전력을 공급하고, 각 구간별로 선로가 분기되어 수용가 또는 분산전원에 연결된 형태이다. 방사형 배전계통에서 고속차단기를 설치 및 운용하는 경우, 고속차단기는 사고 시 발생하는 전류의 크기가 피크값에 도달하기 전에 급속하게 사고전류를 차단하므로, 기존의 AC 배전계통에서 채용하고 있는 협조시간차와 T-C 곡선특성 (반한시)를 이용한 보호협조 방법을

MVDC 배전계통에 동일하게 적용하기 어려운 문제점이 있다. 즉, 보호시간에 협조시간차를 두어 사고구간을 판별할 시간적인 여유가 없어, 메인 컨버터의 동작으로 인하여 정전 구간이 확대 될 가능성이 있다. 그러므로, 기존의 사고전류의 크기에 의한 보호협조 운용방법으로는 방사형 MVDC 배전계통에서의 보호협조가 어렵기 때문에, 사고발생 즉시 메인 컨버터와 구간 컨버터 간의 보호협조 동작을 확실하게 수행할 수 있는 보호협조 운용방안이 요구된다. 따라서, 본 논문에서는 방사형 MVDC 배전계통에 대하여 메인컨버터의 탈락을 방지하기 위해, 사고전류를 제한할 수 있는 CLR을 이용한 MVDC용 보호협조기기를 제시하고자 한다. 즉, 제시한 보호협조기기는 메인 컨버터가 탈락하기 전에 기기 내부의 CLR에 의해 보호협조시간차를 확보하여, 보호기기가 사고구간을 분리할 수 있도록 한다.

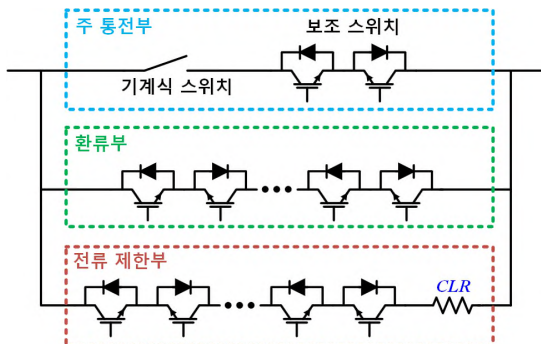


[그림 1] 방사형 구조의 MVDC 배전계통 구성

3. CLR을 이용한 MVDC용 보호협조기기

3.1 보호협조기기 구성

본 논문에서 제안하는 MVDC용 보호협조기기는 그림 2와 같이 주 통전부, 환류부, 전류 제한부로 구성한다. 먼저, 주 통전부는 기계식 스위치와 보조스위치로 구성되며, 정상상태 동작 시 메인 전류가 흐르는 경로이다.

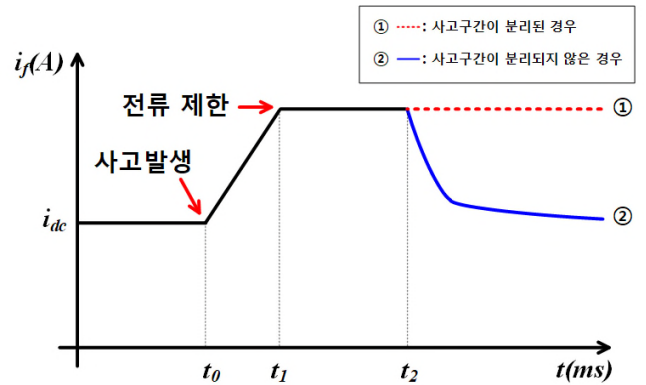


[그림 2] CLR을 이용한 MVDC용 보호협조기기

또한, 기계스위치는 수 ms 이내로 턴-온/오프로 동작하고, 보조스위치는 수 μ s 이내 빠른 턴-온/오프가 가능한 반도체 스위치(IGBT)로 구성한다. 또한, 환류부는 반도체 스위치를 직렬로 구성하고, 이 회로는 주통전부 및 전류 제한부의 스위치들을 영 전압 턴 온/오프로 동작 시키는 것이 특징이다. 한편, 전류 제한부는 환류부의 동일한 스위치 구조와 CLR을 직렬로 구성하며, 메인 컨버터의 전류보호레벨 보다 낮은 전류로 제한하는 역할을 수행하여, 메인컨버터가 사고전류에 의해 탈락되지 않고 보호협조운용을 가능하게 한다.

3.2 보호협조기기의 동작 특성

상기에서 제안한 보호협조기기의 동작은 그림 3과 같이 사고구간이 분리되지 않은 경우와 사고구간이 분리된 경우로 분류할 수 있다. 먼저, 사고구간이 분리되지 않은 경우, 그림 2의 ①과 같이 t_0 에서 MVDC 배전계통의 사고로부터 전류(i_{dc})가 증가한다. $t_1 \sim t_2$ 구간에서는 전류가 CLR에 의해 제한되며, t_2 이후로도 전류는 제한된 전류로 유지된다. 또한, 사고구간이 분리된 경우, 그림 2의 ②와 같이 $t_0 \sim t_2$ 구간에서는 사고구간이 분리되지 않은 경우와 동일하고, t_2 이후에는 사고구간을 분리하므로, 전류가 감소하고 수용가에 안정적으로 전력을 공급한다.



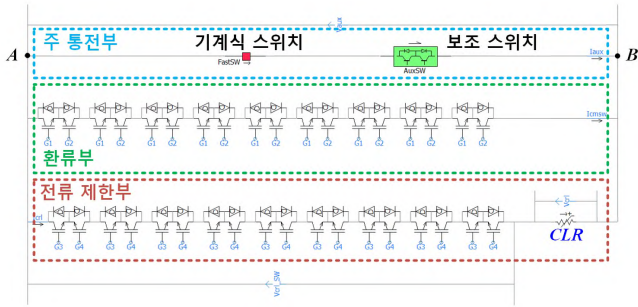
[그림 3] 사고구간 분리 여부에 따른 보호협조기기의 동작 특성

4. PSCAD/EMTDC에 의한 MVDC용 보호협조기기 모델링

4.1 보호협조기기 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용하여 보호협조기기의 모델링을 수행하면 그림 4과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 주 통전부의 기계식 스위치는 수ms 이내 턴-온/오프 동작 하는 것으로 상정하며, 보조스위치는 기계식 스위치와 환류부의 스위칭 동작에 의해 전압정격을 고려하지 않아도 되므로, 전류정격만을 고려한 최소한의 IGBT로 구성한다. 또한, 환류부를 구성

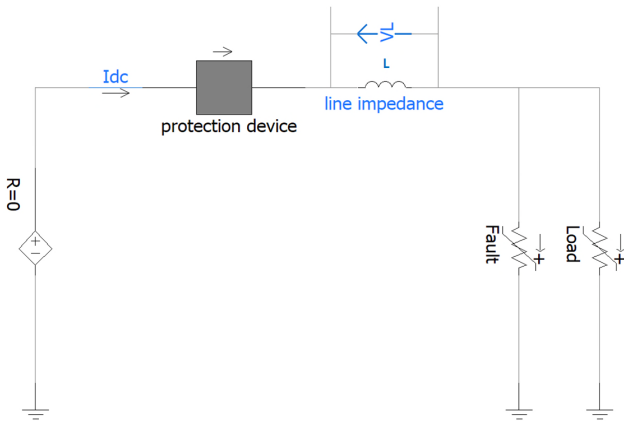
하는 IGBT는 내압 사용률을 60%로 상정하고 직렬로 구성한다. 전류 제한부의 스위치는 환류부와 동일하게 구성하며, CLR의 용량은 전류 제한 레벨($2I_{dc}$)을 고려하여 상정한다. 한편, 보호협조기기를 구성하는 IGBT의 메인 채널에 흐르는 전류가 양방향으로 흐를 수 있어야 하므로, 컬렉터-에미터 방향이 반대인 IGBT 2개를 직렬로 구성한다.



[그림 4] 보호협조기기의 모델링

4.2 MVDC 모의 배전계통 모델링

상기에서 제시한 모델링을 바탕으로, 보호협조기기의 성능을 평가하기 위한 모델링은 그림 5와 같이, DC 전압원, 보호협조기기, 선로 임피던스, 저항부하로 구성한다. 여기서, DC 전압은 MVDC 배전계통의 전압을 bi-pole, 비접지 방식으로 고려하여 70kV(±35kV)로 상정한다.



[그림 5] 보호협조기기의 성능 평가 모델링

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 제안한 MVDC용 배전계통에서의 보호협조기기의 동작 특성을 분석하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, DC전압원의 정격 전압과 용량은 MVDC 배전계통과 유사하게, 각각 24MW, 70kV로 상정한다. 또한, 기계식스위치의 동작시간은 2ms로 상정하며, 반

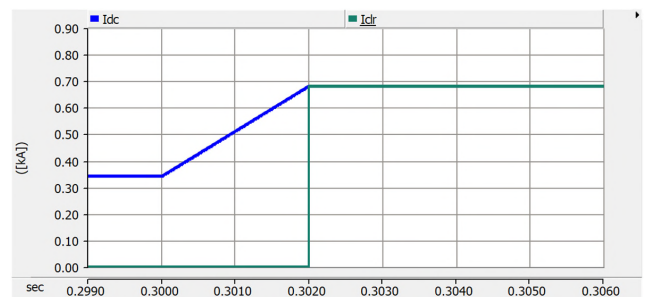
도체스위치의 전압정격과 내압사용률은 사고전류 용량을 고려하여, 각각 6.5kV, 60%로 상정한다. 따라서, 환류부와 전류 제한부의 IGBT 직렬 수는 18개의 스위치로 구성할 수 있다. 한편, 제한하는 사고전류는 CLR의 정격용량을 102.3Ω으로 상정하여, 정격 전류를 2배로 제한한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

| 항 목 | | 내 역 |
|--------------------|--------------|----------|
| DC 전압원 | 정격 용량(Pdc) | 24MW |
| | 입력 전압(Vdc) | 70kV |
| | 입력 전류(Idc) | 342A |
| DC 부하 | 정격 전류(Iload) | 342A |
| 기계식 스위치 | 동작 시간 | 2[ms] |
| 반도체 스위치 | 스위치 종류 | IGBT |
| | 최대 내압 | 6.5[kV] |
| | 최대 정격 전류 | 684[A] |
| | 내압 사용률 | 60[%] |
| 환류부 및 전류제한부 스위치 개수 | 각 18[개] | |
| 선로 임피던스 | 유도성 임피던스 | 0.24H |
| CLR | 정격 용량 | 102.3[Ω] |

5.2 사고구간이 분리되지 않은 경우의 특성분석

표 1의 시뮬레이션 조건에 따라, 사고구간이 분리되지 않은 경우에 대하여, MVDC용 보호협조기기의 동작 특성을 나타내면 그림 6과 같다. 이 그림에서와 같이, $t_0 \sim t_1$ 구간에서는 사고전류가 주 통전부와 환류부의 동작에 의해 전류제한부로 흐르게 됨을 알 수 있다. $t_1 \sim t_2$ 구간에서는 CLR에 의해 전류가 684A로 제한되며, t_2 구간이후로도 사고구간이 분리되지 않으면, 사고전류는 오래 지속되어도 DC 전압원이 탈락되지 않음을 알 수 있다.

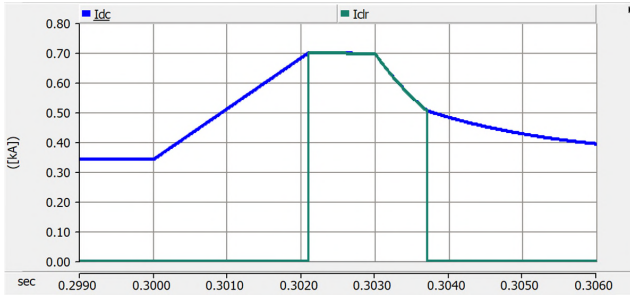


[그림 6] 보호협조기기의 성능 평가 모델링

5.3 사고구간이 분리된 경우의 특성분석

표 1의 시뮬레이션 조건에 따라, 사고구간이 분리된 경우에

대하여, MVDC용 보호협조기기의 동작 특성을 나타내면 그림 7과 같다. 이 그림에서와 같이, $t_0 \sim t_2$ 구간은 사고구간이 분리되지 않은 경우와 동일하게 동작함을 알 수 있고, t_2 구간이 후에 사고구간이 분리되면, i_{dc} 는 감소하고 DC 부하에 안정적으로 전력을 공급함을 알 수 있다.



[그림 7] 보호협조기기의 성능 평가 모델링

6. 결 론

본 논문에서는 CLR을 이용하여 MVDC 배전계통에서 사고전류를 제한하고, 메인 컨버터의 탈락을 방지하는 보호협조기기를 제안하였다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) MVDC용 보호협조기기는 주 통전부, 환류부, 전류 제한부로 구성한다. 먼저, 주 통전부는 기계식 스위치와 보조스위치로 구성되며, 환류부는 반도체 스위치를 직렬로 구성하고, 주통전부 및 전류 제한부의 스위치들을 영 전압 턴 온/오프로 동작 시키는 것이 특징이다. 한편, 전류 제한부는 환류부의 동일한 스위치 구조와 CLR을 직렬로 구성하며, 메인 컨버터의 전류보호레벨 보다 낮은 전류로 제한하는 역할을 수행한다.

(2) CLR을 이용한 보호협조기기의 특성을 분석한 결과, 70kV 선로의 사고전류가 CLR에 의해 메인 컨버터의 과부하 내량 이내로 제한되어, 사고상태가 오래 지속되어도 메인 컨버터는 탈락하지 않고, DC 부하에는 안정적으로 전력을 공급할 수 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20206910100090)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

[1] Changhee Han, Hansang Lee, and Gilsoo Jang, "MVDC

(Medium-Voltage Direct Current) Technology Trends," The Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 68, no. 1, pp. 17-21, 2019.

[2] S. Z. Jamali, S. B. A. Bukhari, M. O. Khan, M. Mehdi, C. H. Noh, G. H. Gwon, and C. H. Kim, "Protection Scheme of a Last Mile Active LVDC Distribution Network with Reclosing Option," Energies, vol. 11, no. 5, 1093, 2018. DOI: 10.3390/en11051093