

# 직류 철도용 MOV 병렬연결 1,800V급 IGBT 직류 고속차단기 연구

## IGBT DC Circuit Breaker with Paralleled MOV for 1,800V DC Railway Applications

한 문 섭<sup>†</sup> · 이 장 무\* · 김 주 락\* · 창 상 훈\* · 김 인 동\*\*  
(Moonseob Han·Chang-Mu Lee·Ju-Rak Kim·Sang-Hoon Chang·In-Dong Kim)

**Abstract** - The rate of rise of the fault current in DC grids is very high compared to AC grids because of the low line impedance of DC lines. In AC grids the arc of the circuit breaker under current interruption is extinguished by the zero current crossing which is provided naturally by the system. In DC grids the zero current crossing must be provided by the circuit breaker itself. Unlike AC grids, the magnetic energy of DC grids is stored in the system inductance. The DC circuit breaker must dissipate the stored energy. In addition the DC breaker must withstand the residual overvoltage after the current interruption.

The main contents of this paper are to:

- . Explain the theoretical background for the design of DC circuit breaker.
- . Develop the simulation model in PSIM of the real scaled DC circuit breaker for 1,800V DC railway.
- . Suggest design guidelines for the DC circuit breaker based on the experimental work, simulations and design process.

**Key Words** : IGBT, Circuit breaker, 1800V DC railway, MOV

### 1. 서 론

직류철도계통에서는 750V 경전철과 1,500V 지하철이 운영되고 있으며 직류철도에서의 안전을 위해서는 직류차단기의 역할이 중요시되고 있다. 주로 직류차단기는 기계식 차단기를 사용하고 있으나 기계식 접점마모에 의한 교체와 함께 교류와 달리 차단 시 아크소호가 어려워 챔버에 의한 소호에도 화재의 위험성이 내재되어 있다. 또한 직류계통은 사고 시 리액턴스분에 의한 급격한 단락전류의 상승으로 빠른 차단시간을 요구한다. 본 논문에서는 1,500V DC 지하철의 변전소용 1,800V DC 반도체 차단기로서 MOV 병렬 연결 IGBT 직류차단기를 조사 및 검토하였으며, 전기철도 급전계통 시뮬레이션을 통하여 고장차단시간에 대한 회로 파라미터의 영향을 분석하였다.

### 2. 본 론

직류철도계통에서는 750V 경전철과 1,500V 지하철이 운영되고 있으며 직류철도에서의 안전을 위해서는 직류차단기의 역할이 중요시되고 있다. 주로 직류차단기는 기계식 차단기를 사용하고

있으나 기계식 접점마모에 의한 교체와 함께 교류와 달리 차단 시 아크소호가 어려워 챔버에 의한 소호에도 화재의 위험성이 내재되어 있다. 또한 직류계통은 사고 시 리액턴스분에 의한 급격한 단락전류의 상승으로 빠른 차단시간을 요구한다. 본 논문에서는 1,500V DC 지하철의 변전소용 1,800V DC 반도체 차단기로서 MOV 병렬 연결 IGBT 직류차단기를 조사 및 검토하였으며, 전기철도 급전계통 시뮬레이션을 통하여 고장차단시간에 대한 회로 파라미터의 영향을 분석하였다.

#### 2.1 직류차단기

차단기는 선로사고시 전원설비의 보호를 위해 전력을 차단하는 중요한 장치이다. 직류는 교류와 다르게 영점을 통과하지 않기 때문에 차단하기가 어려우며 리액턴스의 크기에 비례하여 차단기는 큰 차단 에너지를 감당해야 한다. 직류계통은 주로 철도, 데이터뱅크 및 고압송전(HVDC) 등에 주로 사용되어 왔으며 최근에는 신재생에너지의 증가와 함께 직류배전분야가 사회적 이슈로 대두되면서 직류계통의 이용이 크게 증가될 전망이다.

직류차단기는 교류차단기를 기반으로 하는 기계식차단기가 주류를 이루고 있는데 이러한 기계식 차단기는 차단시간이 50 msec에서 80 msec로 반도체차단기의 차단시간이 수백  $\mu$ sec(Thyristor) 또는 수  $\mu$ sec(IGBT)인 것에 비하면 10배 이상의 큰 차단시간을 갖고 있다. 또한 직류계통에서는 단락고장 시 리액턴스에 의한 전류상승이 큰 점을 고려하면, 기계식 차단기와 같이 차단기의 차단시간이 큰 경우 그동안 차단해야할 고장 전류의 값이 크게 상승하므로 이를 차단하기 위한 차단기의 차단전류가 커야하는 불리한 점을 갖고 있다.

<sup>†</sup> Corresponding Author : Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute, Korea  
E-mail:mshan@krii.re.kr,

\* Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute, Korea

\*\* Dept. of Electrical Eng., Pukyong National University, Korea.

Received : August 30, 2012; Accepted : November 16, 2016

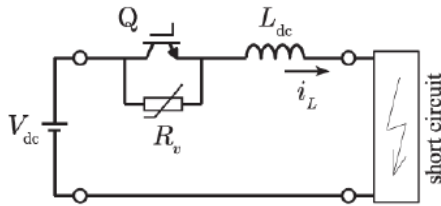


그림 1 소자 병렬형 MOV방식 차단기  
Fig. 1 Circuit Breaker with paralld MOV

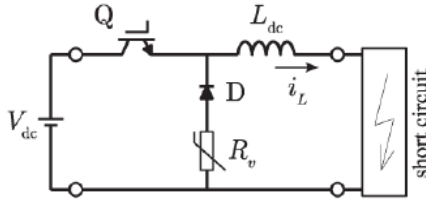


그림 2 환류 다이오드방식 차단기  
Fig. 2 Circuit Breaker with Free Wheeling Diode

하지만 기계식 차단기의 경우 도통 시 도통전압이 거의 영이여서 전력손실이 거의 없는 반면, 반도체 차단기의 경우 도통되어 있을 때 도통전압에 의한 전력손실이 발생하는 단점을 갖고 있으므로 이를 극복하기 위한 하이브리드 차단기(Hybrid circuit breaker)의 개발이 요구되고 있다.

2.2 반도체 차단방식

반도체 차단기의 기본 토폴로지는 그림 1과 같이 반도체와 병렬로 연결된 MOV를 채용한 방식과 그림 2와 같이 선로 양단에 환류다이오드를 설치한 방식으로 나눌 수 있다. 두 경우 반도체 소자의 인가전압이 전원전압보다 커지며 설치형태가 기계식 차단기와 동일한 병렬 MOV 방식을 본 논문에서는 고려한다[1].

또한 반도체 차단기는 전류가 흐르는 방향에 따라 단방향 방식과 양방향 방식으로 나눌 수 있는데 양방향 방식의 경우는 반대 방향으로 연결된 IGBT를 추가하여 양방향으로 전류가 흐를 수 있게 한다[2].

2.2 반도체 차단기 차단특성 시뮬레이션

병렬 MOV를 갖는 단방향 IGBT 반도체 차단기의 차단특성을 모의하기 위해 PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 기본 파라미터는 표 1과 같다.

위 시뮬레이션 조건에서 최대고장전류는

$$I_{\text{최대고장}} = \frac{V_{\text{정격}}}{R_{\text{변전소}} + R_{\text{선로}}} = \frac{1,800[\text{V}]}{0.05[\Omega] + 0.05[\Omega]} = 18,000[\text{A}] \quad (1)$$

가 되므로 단락차단전류를 10,000과 15,000A에 대해 시뮬레이션

표 1 시뮬레이션 조건

Table 1 Simulation Conditions

라미터	값	비고
정격전압	1,800V	차량정격전압 1,500V
정격전류	3,000A	
최대고장전류	18kV이상	
변전소 임피던스	0.05Ω 1mH	
선로 임피던스	0.05Ω/km 1mH/km	고장위치 1km
MOV	0.4Ω, 2,700V	Vmargin = 900V

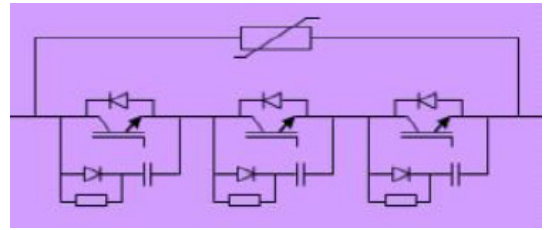


그림 3 단방향 차단기  
Fig. 3 Unidirectional Circuit Breaker

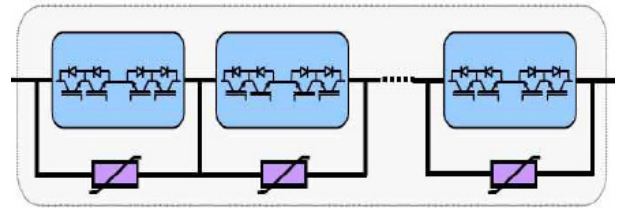


그림 4 양방향 차단기  
Fig. 4 Bidirectional Circuit Breaker

을 수행하였다. 초기 0.005초에 반도체 차단기가 도통되어 3,000A에 도달하면 0.02초에 선로에 단락을 발생시키는 절차를 수행하였다. 각각 단락차단전류를 10,000과 15,000A에 수행한 결과는 그림 6 및 그림 7과 같다.

그림 6과 같이 단락차단전류가 10,000A인 경우, 0.033초에 10,000A에 도달하였으며 0.042초에 차단이 종료되었으며, 이때 MOV의 9m초 동안의 흡수에너지는

$$W_{\text{MOV}} = \left( \frac{V_{\text{정격}}}{V_{\text{Margin}}} + 1 \right) \frac{L_{\text{변전소}} + \text{선로 } I_{\text{고장전류}}^2}{2} \quad (2)$$

$$= \left( \frac{1,800}{900} + 1 \right) \frac{0.002 \times 10,000^2}{2} = 300[\text{kJ}]$$

가 된다[3].

그림 7과 같이 단락차단전류가 15,000A인 경우, 0.053초에 15,000A에 도달하였으며 0.063초에 차단이 종료되었으며, 이때 MOV의 10m초 동안의 흡수에너지는

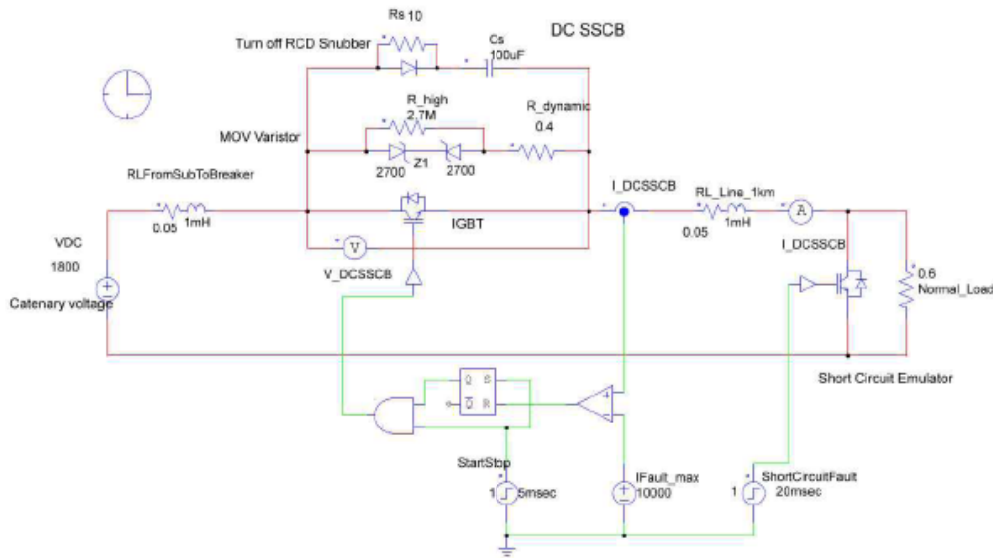


그림 5 단락고장 모의 PSIM 모델  
Fig. 5 PSIM Model of Fault Condition

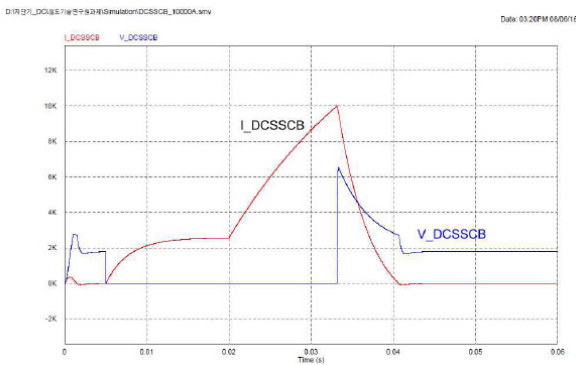


그림 6 단락차단전류 10kA 차단기 전압전류 파형  
Fig. 6 Waveform of Short Cuicuit Current 10kA

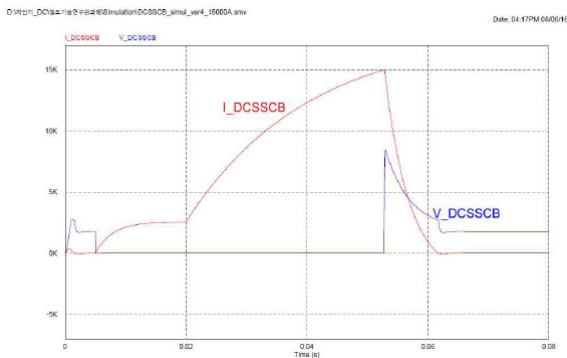


그림 7 단락차단전류 15kA 차단기 전압전류 파형  
Fig. 7 Waveform of Short Cuicuit Current 17kA

표 2 시뮬레이션 결과  
Table 2 Simulation Results

파라미터	시뮬레이션 1	시뮬레이션 2	증가비율
단락 차단전류	10,000A	15,000A	1.5
차단시간	13msec	33msec	2.5
차단지속시간	9msec	10msec	1.1
MOV 흡수에너지	300kJ	675kJ	2.2
단락 최대전압	660V	900V	1.4

$$\begin{aligned}
 W_{MOV} &= \left( \frac{V_{정격}}{V_{Margin}} + 1 \right) \frac{L_{변전소+선로} I_{고장전류}^2}{2} \\
 &= \left( \frac{1,800}{900} + 1 \right) \frac{0.002 \times 15,000^2}{2} = 675[kJ]
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

가 된다.

단락차단전류의 변화 따른 각종 회로 파라미터를 정리하면 표 2와 같다.

단락차단전류를 10kA에서 15kA로 1.5배 상승시켰을 때 리액턴스에 저장된 에너지의 상승으로 인해 차단시간과 MOV 흡수에너지는 2배 이상 증가한다. 차단시간을 감소하려면 단락차단전류를 줄여야 하고 단락차단전류는 MOV의 용량에 큰 영향을 미친다. 차단지속시간과 단락최대전압이 각각 1.1과 1.4배 상승하여

단락차단전류 상승은 두 파라미터와 밀접한 관계를 가질 수 있으며 특히 단락최대전압의 상승을 야기시킨다.

### 3. 결 론

직류계통에서의 단락사고는 큰 단락전류에 의해 2차 사고로의 전파가능성을 내재하고 있다. 기존에 사용하고 있는 기계식 차단기는 신뢰성은 어느 정도 보장되나 안전성 및 유지보수성에서 떨어져 최근에는 직류배전과 HVDC 등의 도입과 함께 반도체 차단기의 관심이 대두되고 있다. 하지만 반도체 차단기의 경우 차단속도가 빠른 큰 장점을 갖고 있으나 도통 중 전력손실이 크게 발생하여 부가적으로 방열을 해야 하는 단점을 갖고 있다.

본 논문에서는 MOV와 IGBT로 구성된 직류 반도체 차단기에 대하여 차단전류에 변화에 따른 차단시간, 차단지속시간, MOV 흡수에너지 및 단락최대전압을 검토하였다. 그 결과 차단전류가 증가되면 차단지속시간과 단락최대전압의 값이 비례적으로 증가하는 것을 볼 수 있으며 차단시간과 MOV 흡수 에너지는 2배 이상 증가 하였다. 이를 해결하기 위해 향후 도통 전력손실을 줄이고 차단시간도 기계식보다 짧은 Hybrid 직류차단기의 개발이 시급하겠다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### References

- [1] Hajin Li, Jiaman Zhou, Zhaoyu Liu, Dehong Xu, "Solid State DC Circuit Breaker for Super Uninterruptible Power Supply", 2014 International Power Electronics and Application Conference and Exposition, 2014
- [2] Eivind Odegaard Norum, "Design and Operation Principle of DC Circuit Breakers", Norwegian University of Science and Technology, Master Thesis, 2016
- [3] Kemichiro Sano, "A Surgeless Solid-State DC Circuit Breaker for Voltage Source Converter Based HVDC Systems", IEEE transaction on Industry applications, Vol. 50, No. 4, 2014

## 저 자 소 개



#### 한 문 섭 (Moonseob Han)

1964년 11월 26일생. 1987년 인하대학교 전기공학과 졸업, 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1989~1994년 국방과학연구소 근무, 1995년~현재 한국철도기술연구원 책임연구원



#### 이 장 무 (Chang-mu Lee)

1969년 10월 4일생. 1991년 한양대학교 공대 전자통신공학과 졸업, 1994년 동 대학원 전자통신공학과 졸업(공학석사), 2013년 고려대학교 전기공학과 졸업(공학박사), 1997~현재 한국철도기술연구원 책임연구원



#### 김 주 락 (Ju-Rak Kim)

1974년 3월 22일생. 1997년 홍익대 전자전기공학부 졸업. 1999년 동대학원 전기제어공학과 졸업(공학석사). 2010년 동대학원 전기정보제어공학과 졸업(공학박사). 2000년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원



#### 창 상 훈 (Sang-Hoon Chang)

2002년 홍익대 대학원 전기정보제어공학과 졸업(공학박). 1992년~1994년 철도청 기술연구소. 1994년~현재 한국철도기술연구원 수석연구원



#### 김 인 동 (In-Dong Kim)

1960년 8월 27일 생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1991년 동대학원 졸업(공학박). 1991~1996년 대우중공업 철도차량연구소 책임연구원. 1997~1998년 미국 Univ. of Tennessee 방문교수. 2004~2005년 미국 Virginia Tech 방문교수. 1996~현재 부경대 전기공학과 교수.