

# LVDC 계통에서 사고전류 경사각에 의한 사고구간 분리장치의 구현에 관한 연구

한병길\*\*\*, 박재범\*\*, 김윤호\*, 이나경\*, 노대석\*  
\*한국기술교육대학교, \*\*한국화학융합시험연구원  
e-mail:bghan@koreatech.ac.kr

## An Implementation of Fault Isolation Device Considering Slope Characteristics of Fault Current in LVDC Distribution System

Byeong-Gill Han\*\*\*, Jae-Bum Park\*\*, Yun-Ho Kim\*, Na-Kyung Lee\*, Dae-Seok  
Rho\*

\*Korea University of Technology and Education

\*\*Korea Testing & Research Institute

요 약

최근, 전세계적으로 신재생에너지 전원과 DC 부하가 지속적으로 증가하고 있어, 에너지 손실 감소, 수용성 향상 등의 장점을 가진 LVDC 계통에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 LVDC 계통은 기존의 AC 방식에서 채용하고 있는 협조시간차와 T-C 곡선특성을 이용한 보호협조 방법을 동일하게 적용하기 어려운 문제점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 선로정수와 구간컨버터의 2차측 전압 및 수용가 부하전류에 의한 사고전류의 경사각 특성을 바탕으로 신속하고 정확하게 사고구간을 건전구간으로부터 분리할 수 있는 사고구간 분리장치를 제안한다. 이 장치는 반도체 스위치, 게이트 드라이브, CLR 등의 H/W 장치부와 제어보드, A/D 변환, 스위치 제어, 보호기능 등의 S/W 운용부로 구성된다. 이를 바탕으로 시험을 수행한 결과, 본 논문에서 제안한 사고구간 분리장치는 사고전류 경사각 특성을 바탕으로 사고의 발생 유·무를 빠르게 감지하고, 사고전류를 수  $\mu$ s 이내에 신속하게 제한시켜 LVDC 계통의 정전을 최소화할 수 있음을 알 수 있다.

### 1. 서 론

최근, 전세계적으로 신재생에너지 전원과 DC 부하가 지속적으로 증가하고 있어, 에너지 손실 감소, 수용성 향상 등의 장점을 가진 LVDC 계통에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1, 2]. 그러나, 이러한 구조의 LVDC 계통은 기존의 AC 방식에서 채용하고 있는 협조시간차와 T-C 곡선특성(반한시)를 이용한 보호협조 방법을 동일하게 적용하기 어려운 문제점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 사고전류의 경사각 특성을 바탕으로 신속하고 정확하게 사고구간을 건전구간으로부터 분리할 수 있는 사고구간 분리장치(fault isolation device, FID)를 제시한다. 또한, 사고구간 분리장치를 제어하기 위해, LVDC 계통에서 선로정수, 구간컨버터의 2차측 전압 및 수용가 부하전류에 따른 경사각 특성을 제시하고, 사고구간을 건전구간으로부터 분리할 수 있는 사고구간 분리장치를 제안한다. 이 장치는 H/W 장치부와 S/W 운용부로 구성되는데, H/W 장치부는 반도체 스위치와 게이트 드라이브, CLR(current limit resistor), 전압 및 전류센서로 이루어지며, 반도체 스위치 개수와 CLR의 용량은 LVDC 계통의 규모, 용

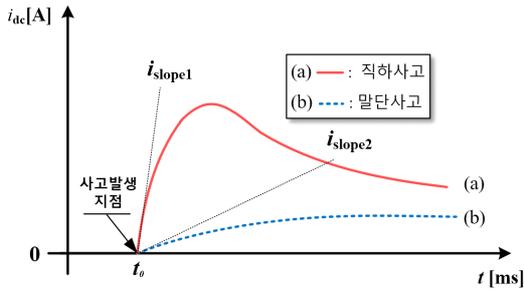
량, 공급전압 등을 고려하여 산정한다. 또한, S/W 운용부는 제어보드와 A/D 변환, 스위치 제어, 보호기능 등으로 구성된다. 상기에서 제시한 시험장치를 바탕으로 사고구간 분리장치의 동작 특성을 분석한 결과, 본 논문에서 제시한 사고구간 분리장치는 신속하고 정확하게 사고의 발생 유·무를 판별하고, 모든 파라미터 조건에서 빠른 응답으로 동작모드를 전환하여 메인컨버터의 탈락을 방지할 수 있음을 알 수 있다.

### 2. LVDC 계통에서 사고전류의 경사각 특성

#### 2.1 선로정수에 의한 사고전류 경사각 특성

저압직류(low voltage direct current, LVDC) 계통에서 사고가 발생하는 경우, 사고전류의 크기와 경사각은 사고지점까지의 선로정수와 부하의 크기에 따라 서로 다른 특성을 가지게 된다. 그림 1은 사고지점에 따른 사고전류 특성을 나타낸 것으로, 그림 1의 (a) 곡선과 (b) 곡선은 각각 LVDC 배전 선로의 직하지점과 말단지점에서 사고가 발생한 경우를 나타낸다. 여기서, 그림 1의 (a) 곡선과 같이, 직하사고의 경우 사고지점까지의 낮은 임피던스로 인하여 사고 발생 시간대인  $t_0$

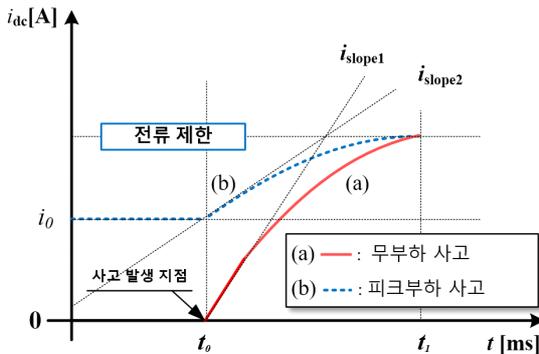
를 기준으로 매우 큰 사고전류가 발생하여 큰 변화분을 갖게 되고, 그림 1의 (b) 곡선과 같이 말단사고의 경우에는 선로가 가지는 큰 임피던스 성분에 의해 (a) 곡선보다 상대적으로 작은 사고전류가 흐르고, 그 변화분은 적게 된다.



[그림 1] 선로정수에 의한 사고전류 경사각 특성

## 2.2 구간컨버터의 2차측 전압 및 수용가 부하전류 따른 경사각 특성

그림 2는 구간컨버터의 2차측 전압이 동일한 조건에서의 수용가 부하전류 크기에 따른 사고전류 특성을 나타낸 것으로, (a) 곡선과 (b) 곡선은 무부하와 피크부하의 사고전류 특성을 나타낸 것이다. 여기서, 2의 (a) 곡선과 같이, 무부하 시 사고전류의 변화분은 초기에 크게 나타나고, (b) 곡선과 같이 피크부하 시 사고전류의 변화분은 초기에 작은 값을 가진다. 즉, 무부하 시 사고전류의 경사각은 크고, 피크부하 시 사고전류의 경사각은 작은 값을 가진다.



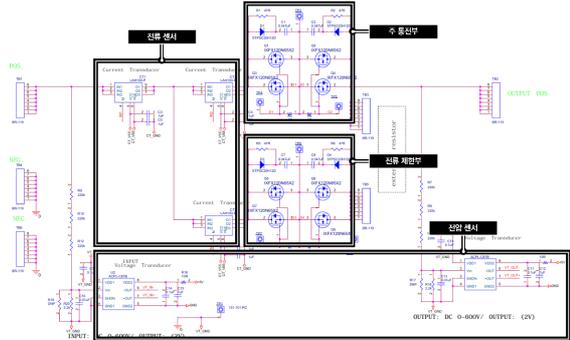
[그림 2] 구간컨버터의 2차측 전압에 따른 경사각 특성

## 3. LVDC 계통에서 사고전류 경사각에 의한 사고구간 분리장치의 구현

### 3.1 H/W 장치부

사고구간 분리장치의 H/W 장치부는 그림 3과 같이, 메인 및 전류제한 스위치, CLR, 전압센서, 전류센서, SMPS 등으로 구성된다. 여기서, 전류제한 스위치는 주 통전부와 전류 제한부에 대하여 각각 1개의 모듈을 적용하고, 이를 독립적으로

동작시키기 위하여 게이트 드라이브와 SMPS로 구성한다. 또한, 3개의 전압센서는 1차측과 2차측, 메인 스위치의 양단 전압을 측정하고, 3개의 전류센서는 1차측, 주 통전부, 전류 제한부의 전류를 각각 측정한다. 이를 바탕으로 사고구간 분리 장치의 H/W 장치부를 구현하면 그림 4와 같다.



[그림 3] 사고구간 분리장치의 H/W 장치부 디자인

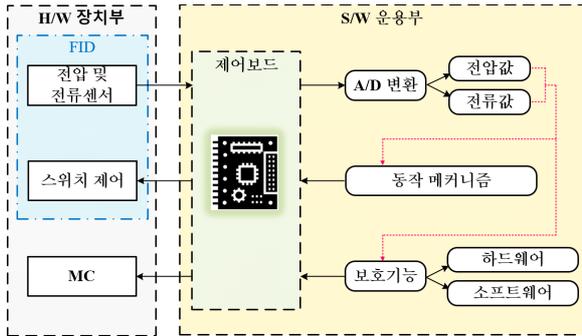


[그림 4] 사고구간 분리장치의 H/W 장치부 구현

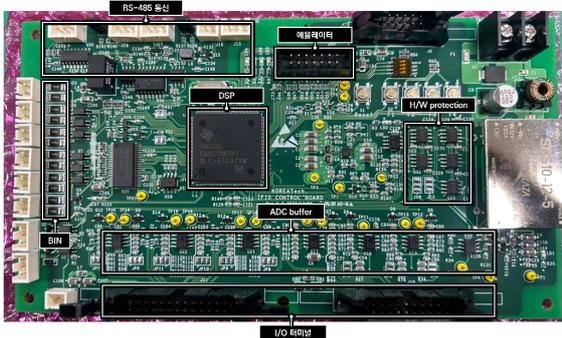
### 3.2 S/W 운용부

사고구간 분리장치를 운용하기 위한 S/W 운용부는 그림 5과 같이 제어보드와 A/D 변환, 스위치 제어, 보호기능 등으로 구성된다. 즉, H/W 장치부의 센서를 통해 입력된 아날로그 전압 및 전류값은 S/W 운용부를 통해 디지털 신호로 변환된 후, 인터럽트 동작방식을 이용하여 스위치 제어와 보호기능을 수행한다. 즉, S/W 운용부는 CCS(code composer studio) tool과 제어 및 통신을 담당하는 제어보드로 구성된다. 여기서, CCS는 마이크로프로세서용 통합 개발 프로그램 (integrated development environment, IDM)이며, 반도체 소자(MOSFET, IGBT)의 실시간 제어와 디버깅 기능을 가진다. 한편, 사고구간 분리장치의 제어보드는 그림 6과 같이, 디지털 신호 프로세서(digital signal processor, DSP)와 PWM 포트, A/D포트, 통신포트로 구성된다. 여기서, DSP는 각 소자들을 독립적으로 제어할 수 있는 TMS320F28337를 채용한다. 이 DSP는 150 [MHz]의 클럭으로 동작하며, 총 12개의 PWM(pulse width modulation) 포트와 16개의 ADC 채널을 사용할 수 있어, 여러 개의 전압 및 전류 계측과 스위치를 동시에 제어할 수 있다. 또한, PWM 포트는 사고구간 분리 장치의 스위치의 턴-온/오프와 MC 동작을 위해 사용되며, A/D

포트는 사고구간 분리장치 내의 센서로부터 입력된 전압 및 전류를 디지털 신호로 변환시키고, 통신포트는 전압과 전류 등의 각종 정보를 전달하는 역할을 수행한다. 한편, H/W 장치부와 S/W 운용부로 구성된 사고구간 분리장치를 구현하면 그림 5-11과 같이 나타낼 수 있다.



[그림 5] 사고구간 분리장치의 S/W 운용부 구성도



[그림 6] 사고구간 분리장치의 제어보드 구현

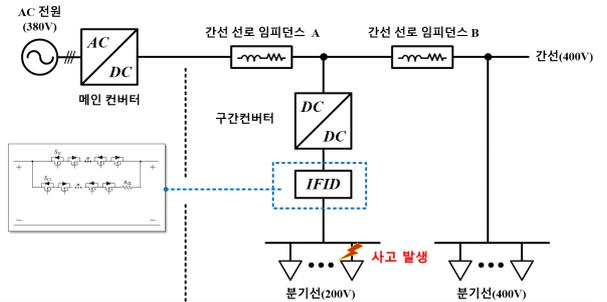
## 4. 시험 결과 및 분석

### 4.1 시험 조건

본 논문에서 제시한 사고구간 분리장치의 동작 특성을 평가하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다. 여기서, 메인컨버터와 구간컨버터의 용량은 각각 12 [kW], 5 [kW]이고, 메인컨버터와 구간컨버터의 2차측 출력전압은 각각 400 [V<sub>DC</sub>], 200 [V<sub>DC</sub>]로 상정한다. 또한, 선로 임피던스는 각각 1 [Ω]+j5.36[mH]와 2[Ω]+j10.6[mH]이고, 각 구간컨버터 수용가의 부하는 각각 4 [kW]이며, 상정 시나리오 조건은 피크 부하의 10%와 100%인 0.8 [kW]와 8 [kW]로 설정한다. 한편, 구간컨버터의 내부 임피던스는 100 [μH]와 500 [μH]로 상정한다. 또한, 그림 7과 같이 DC 모의 배전계통에서 메인컨버터와 A 구간컨버터까지의 선로임피던스는 1 [Ω]+5.36 [mH]와 2 [Ω]+10.6 [mH], A 구간컨버터의 수용가 부하는 0.4 [kW]와 8 [kW], A 구간컨버터의 내부 임피던스는 100 [μH]와 500 [μH]로 상정한다. 또한, 단락사고는 A 구간컨버터의 2차측에서 발생한 것으로 설정한다.

[표 1] 시험 조건

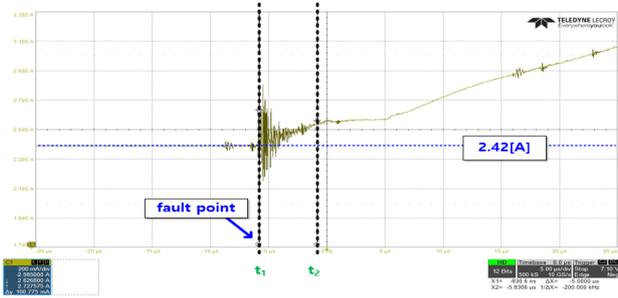
항목		내용	
사고구간 분리장치	스위치 모듈	종류	MOSFET
		모듈 수 [EA]	2
		절연내력 [V]	650
		스위치 내압 사용률 [%]	60
	전류 제한 저항 [Ω]	5.8	
메인 컨버터	정격 [kW]	12	
	입력 전압 [V <sub>AC</sub> ]	380	
	출력 전압 [V <sub>DC</sub> ]	400	
구간 컨버터	정격 [kW]	5	
	입력 전압 [V <sub>DC</sub> ]	400	
	출력 전압 [V <sub>DC</sub> ]	200	
선로임피던스		1 [Ω]+5.36 [mH], 2 [Ω]+10.6 [mH]	
수용가 부하		0.8 [kW], 8 [kW]	
구간컨버터 내부 임피던스		100 [μH], 500 [μH]	



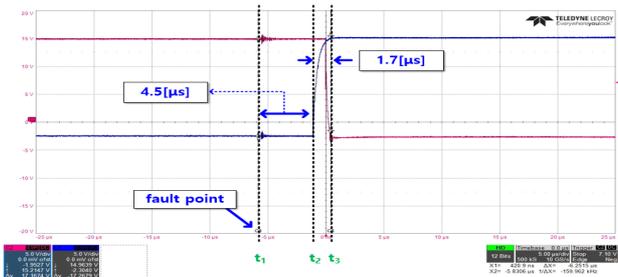
[그림 7] 사고구간 분리장치의 동작 특성을 분석하기 위한 LVDC 모의계통

### 4.2 선로정수에 따른 사고구간 분리장치의 동작 특성

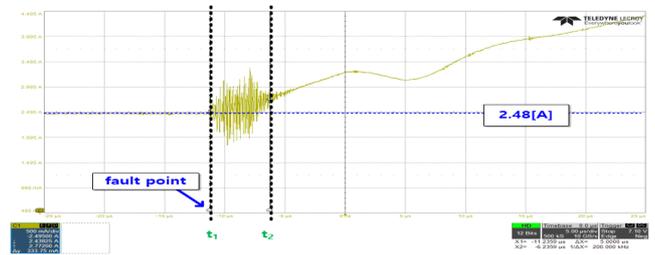
A 구간컨버터의 2차측에서 단락사고가 발생하는 경우, 선로정수(1 [Ω]+5.36 [mH])에 따른 사고구간 분리장치의 동작 특성을 나타내면 그림 8과 같다. 여기서, 그림 8의 (a)는 사고전류의 경사각 크기이며, 그림 8의 (b)는 사고구간 분리장치에 의하여 사고전류가 제한되는 운용특성을 나타낸 것이다. 즉, 그림 8의 (a)와 같이  $t_1$  지점에서 사고가 발생하면, 사고전류가 급격하게 증가하기 시작하고, 사고전류의 경사각은 31[A/ms]로 산정된다. 또한, 선로정수를 다양하게 고려하여 사고구간 분리장치의 동작 특성을 나타내면 표 2와 같다. 여기서, 선로정수가 2 [Ω]+10.6 [mH]로 증가한 경우, 사고전류 경사각은 26 [A/ms]로 감소하지만, 사고구간 분리장치는 사고의 발생 유·무를 빠르게 감지할 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 구현한 사고구간 분리장치는 사고전류를 39[μs] 이내에 신속하게 제한시켜, 메인컨버터의 탈락을 방지할 수 있음을 알 수 있다.



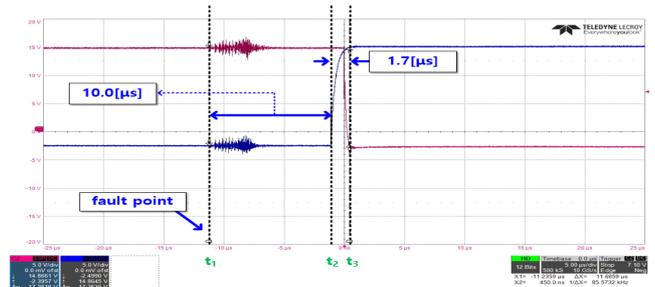
(a) 사고전류 경사각 특성



(b) 메인 및 전류제한 스위치 게이트 드라이브 전압  
[그림 8] 선로정수에 따른 사고구간 분리장치의 동작 특성



(a) 사고전류 경사각 특성



(b) 메인 및 전류제한 스위치 게이트 드라이브 전압  
[그림 9] 구간컨버터 2차측 전압 및 전류에 따른 사고구간 분리장치의 동작 특성

[표 2] 선로정수에 따른 사고구간 분리장치의 시나리오별 동작 특성

항목	사고전류 경사각 [A/ms]	동작 시간 [μs]
1 [Ω]+5.36[mH]	50.4	6.2
2 [Ω]+10.6[mH]	23.2	8.6

[표 3] 구간컨버터 2차측 전류에 따른 사고구간 분리장치의 시나리오별 동작 특성

항목	사고전류 경사각 [A/ms]	동작 시간 [μs]
0.8[kW]	66.8	11.7
8[kW]	38.3	8.0

### 4.3 구간컨버터의 2차측 전압 및 수용가 부하전류 따른 사고구간 분리장치의 동작 특성

구간컨버터의 2차측 전압 및 수용가 부하전류(0.8 [kW])에 따른 사고구간 분리장치의 동작 특성을 나타내면 그림 9와 같다. 여기서, 그림 9의 (a)는 사고전류 경사각의 크기이고, 그림 9의 (b)는 메인 스위치와 전류제한 스위치의 게이트 드라이브 전압을 나타낸다. 즉, 그림 9의 (a)와 같이  $t_1$  지점에서 사고가 발생하면, 사고전류는 급격하게 증가하기 시작하며, 사고전류의 경사각은 66.8 [A/ms]로 산정된다. 또한, 사고구간 분리장치가 그림 9의 (b)와 같이  $t_1$  지점부터 약 10.0 [μs] 이후에 보조동작 모드로 전환되어 전류 제한부를 턴-온시키고,  $t_2$  지점부터 1.7 [μs] 이내에 주동작 모드로 전환되어 주동전부를 차단한다. 또한, 구간컨버터의 2차측 수용가 부하전류를 다양하게 고려하여 사고구간 분리장치의 동작 특성을 나타내면 표 6-8과 같다. 여기서, 구간컨버터의 2차측 수용가 부하가 8 [kW]로 증가한 경우, 사고전류 경사각은 38.3 [A/ms]로 감소하지만, 사고구간 분리장치는 사고의 발생 유무를 빠르게 감지할 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 구현한 사고구간 분리장치는 사고전류를 11.7 [μs] 이내에 신속하게 제한시켜, 메인컨버터의 탈락을 방지할 수 있음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 선로정수와 구간컨버터의 2차측 출력전압과 수용가 부하전류에 따른 사고전류 경사각 특성을 제시하고, 반도체 스위치, 게이트 드라이브, CLR 등의 H/W 장치부와 제어보드, A/D 변환, 스위치 제어, 보호기능 등의 S/W 운용부로 구성된 LVDC 계통용 사고구간 분리장치를 구현한다. 이를 바탕으로 시험을 수행한 결과, 본 논문에서 제시한 사고전류의 경사각 특성을 고려한 사고구간 분리장치는 신속하고 정확하게 사고의 발생 유무를 판별하고, 모든 파라미터 조건에서 빠른 응답으로 동작모드를 전환하여 메인컨버터의 탈락을 방지할 수 있음을 알 수 있다.

### 참고문헌

- [1] 김하늘 외 1명, “국가 신재생에너지 보급계획에 따른 전력부분의 2050 탄소중립 달성도 분석”, 한국신재생에너지학회, pp. 194, 2024.05.
- [2] 이민행 외 5명, “태양광전원의 연계용량에 따른 ±35kV급 MVDC 실증배전망의 경제성평가 모델링”, 한국산학기술학회 논문지, 25권, 제 2호, pp. 504-513, 2024.02.