

# 350V DC 선로용 4kW급 사고전류 제한장치의 설계 및 구현

이나경\*, 김윤호\*, 태동현\*, 최형석\*\*, 노대석\*

\*한국기술교육대학교 전기공학과

\*\*티팩토리

e-mail: naku9908@koreatech.ac.kr

## A Design and Implementation of 4kW Scaled Fault Current Limiter in 350V DC Distribution System

Na-Kyung Lee\*, Yun-Ho Kim\*, Dong-Hyun Tae\*, Hyoung-Seok Choi\*\*, Dae-Seok Rho\*

\*Korea University of Technology and Education

\*\*Technology Factory

### 요약

최근, 신재생에너지 전원의 도입 및 DC 부하의 증가, 고품질, 고신뢰성의 전력요구 등으로, DC 배전계통에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그러나, DC 배전계통에서 사고가 발생하는 경우, AC 배전계통에 비해 사고전류가 매우 가파르게 증가하게 되어, 내부 소자를 보호하기 위해, 메인 컨버터가 탈락할 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 LVDC 배전계통에서 사고에 의한 메인컨버터의 탈락을 방지하기 위하여, 사고전류를 제한시킬 수 있는 350V DC 선로용 4kW급 사고전류 제한장치를 구현한다. 이 장치는 H/W 시스템과 S/W 시스템, 등으로 구성되며, 동작 메커니즘은 초기 동작모드, 예비 동작모드, 주 동작모드, 회복 동작모드의 4가지 모드로 구분된다. 여기서, H/W 시스템은 IGBT와 전류제한 저항, 센서, 등을 이용하여 주 통전부와 전류 제한부를 구성하고, S/W 시스템은 DSP와 A/D 변환기, 등을 이용하여 시스템의 제어를 단일 프로세서로 수행한다. 이를 바탕으로 동작 특성을 분석한 결과, 350V DC 계통에서 사고가 발생한 경우 사고전류 제한장치가 사고전류를 신속하게 제한하여, 사고구간을 분리할 수 있는 시간을 확보하고, 메인 컨버터의 탈락을 방지하여 LVDC 배전계통의 정전을 방지할 수 있음을 알 수 있었다.

## 1. 서론

최근, 신재생에너지 전원의 도입 및 DC 부하의 증가, 고품질, 고신뢰성의 전력요구 등으로, DC 배전계통에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그러나, DC 배전계통에서 사고가 발생하는 경우, AC 배전계통에 비해 사고전류가 매우 가파르게 증가하게 되어, 내부 소자를 보호하기 위해, 메인 컨버터가 탈락할 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 LVDC 배전계통에서 사고에 의한 메인컨버터의 탈락을 방지하기 위하여, 사고전류를 제한시킬 수 있는 350V DC 선로용 4kW급 사고전류 제한장치를 구현한다. 이 장치는 H/W 시스템과 S/W 시스템, 등으로 구성되며, 동작 메커니즘은 초기 동작모드, 예비 동작모드, 주 동작모드, 회복 동작모드의 4가지 모드로 구분된다. 여기서, H/W 시스템은 IGBT와 전류제한 저항, 센서, 등을 이용하여 주 통전부와 전류 제한부를 구성하고, S/W 시스템은 DSP와 A/D 변환기, 등을 이용하여 시스템의 제어를 단일 프로세서로 수행한다. 이를 바탕으로 동작 특성을 분석한 결과, 350V DC 계통에서 사고가 발생한 경우 사고전류 제한장치가 사고전류를 신속하게 제한하여, 사고구간을 분리할

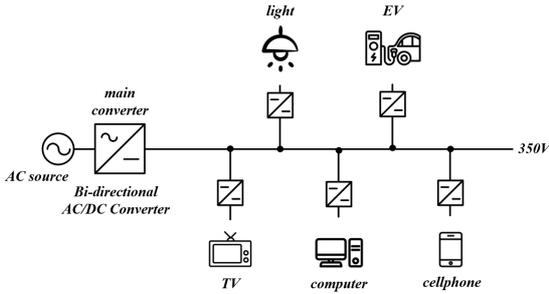
수 있는 시간을 확보하고, 메인 컨버터의 탈락을 방지하여 LVDC 배전계통의 정전을 방지할 수 있음을 알 수 있었다.

## 2. 가정용 DC 배전계통의 운용특성 및 사고전류 제한장치의 동작 메커니즘

### 2.1 가정용 DC 배전계통의 운용특성

가정용 DC 배전계통은 그림 1과 같이 350V 선로에 가전제품들을 운영자의 필요에 따라 DC/DC 컨버터를 이용하여 다양하게 구성할 수 있다. 이러한 LVDC 배전계통에서는 메인 컨버터(AC-DC, DC-DC)와 수 ms로 동작하는 보호기기가 설치되어 운용되는데, 분기선에 사고가 발생하는 경우, 메인 컨버터에 흐르는 전류의 크기가 과부하 내량을 초과하여 메인 컨버터가 탈락할 가능성이 있다. 이때, 메인컨버터에 내장된 보호기능(H/W, S/W)은 반도체 소자들을 보호하기 위해, 센서로부터 측정된 파라미터가 보호 범위를 벗어나면 수 ms 이내에 순시적으로 동작하기 때문이다. 즉, LVDC 배전선로의 간선, 분기선에 설치된 보호기기들은 사고구간 판별과 보호협조 동작을 수행할 시간적인 여유가 없게 되어, 정전구간

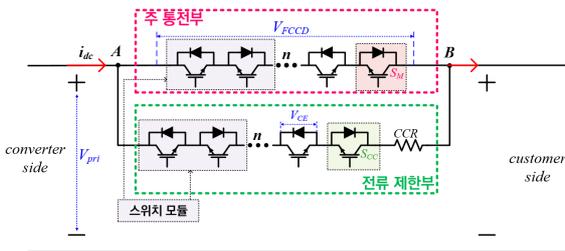
이 확대될 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 DC 배전계통에서 사고가 발생하는 경우, 메인 컨버터의 급격한 탈락을 방지하고 정전구간을 최소화하기 위하여, 사고전류를 제한할 수 있는 350V DC 선로용 4kW급 사고전류 제한장치의 설계 방안을 제시한다.



[그림 1] 가정용 DC 배전계통의 구성

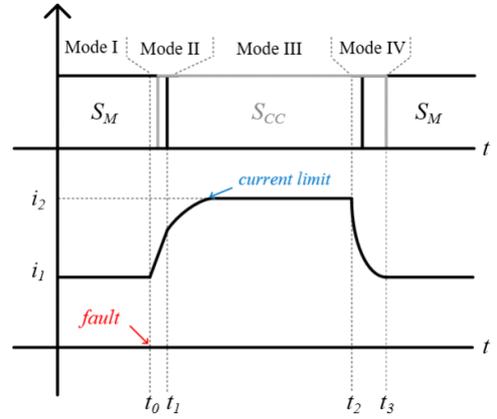
## 2.2 사고전류 제한장치의 구성 및 동작 메커니즘

LVDC 배전계통에서 사고구간 분리를 위한 사고전류 제한장치는 그림 2와 같이 주 통전부(main path)와 전류 제한부(current clamping path)로 구성한다. 여기서, 주 통전부는  $n$  개의 스위치 모듈을 직렬로 연결한 메인 스위치( $S_M$ )로 구성되고, 전류 제한부는 전류제한 스위치( $S_{CC}$ )와 전류제한 저항( $R_{CC}$ )으로 구성되는데, 전류 제한부는 주 통전부의 메인 스위치와 동일한 형태를 가진다. 또한, 주 통전부와 전류 제한부의 스위치는 높은 내압을 가지고 수  $\mu s$  이내에 빠르게 동작하는 소자인 반도체 스위치(IGBT)를 채용하며, 스위치 모듈은 전류를 양방향으로 제어하기 위하여 2개 스위치의 에미터를 공통으로 접속한다.



[그림 2] LVDC 배전계통용 사고전류 제한장치의 구성

한편, 사고전류 제한장치의 동작 메커니즘은 그림 3과 같이 초기 동작 모드, 보조 동작 모드, 주 동작 모드, 회복 동작 모드로 나눌 수 있다. 여기서, 주 동작모드의 전류 제한 개념은  $t_0$ 에서 사고가 발생한 경우, 사고전류 제한장치가  $t_1$  시간대에 동작하여 사고구간을 분리하는  $t_2$  시간대까지 사고전류( $i_{dc}$ )를 제한하는 것이다[1].



[그림 3] 사고전류 제한장치의 동작 메커니즘

## 3. 350V DC 선로용 4kW급 사고전류 제한장치의 설계

### 3.1 H/W 장치부

사고전류 제한장치의 반도체 스위치 모듈 개수( $m$ )는 사고전류 제한장치 전압( $V_{FCCD}$ )에서 IGBT 컬렉터-에미터 내압( $V_{CE}$ )과 스위치 내압의 사용률( $k$ )을 나눈 값으로 산정하며, 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

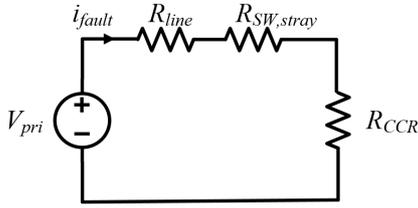
$$m = \left\lceil \frac{V_{FCCD}}{2kV_{CE}} \right\rceil \quad (1)$$

여기서,  $m$ : 반도체 스위치 모듈 개수,  $V_{FCCD}$ : 사고전류 제한장치 양단 전압[kV],  $k$ : IGBT 내압 사용률,  $V_{CE}$ : IGBT 컬렉터-에미터 내압[kV]

한편, 사고전류 제한장치가 주 동작모드인 경우, 사고전류에 대한 등가회로도도 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 전류제한 저항( $R_{CCR}$ )에 걸리는 전압은 선로임피던스와 반도체 스위치의 기생저항에 각각 분배된다. 따라서, 전류제한 저항값은 식 2와 같이 공급 전압( $v_{pri}$ )을 메인컨버터의 정격전류( $i_{dc}$ )와 과부하 내량( $k_m$ )으로 나눈 값에서 선로임피던스 저항( $R_{line}$ )과 반도체스위치의 기생 저항값( $R_{SW, stray}$ )을 뺀 값으로 산정한다.

$$R_{CCR} = \frac{v_{pri}}{k_m \times i_{n,max}} - R_{line} - R_{SW, stray} \quad (2)$$

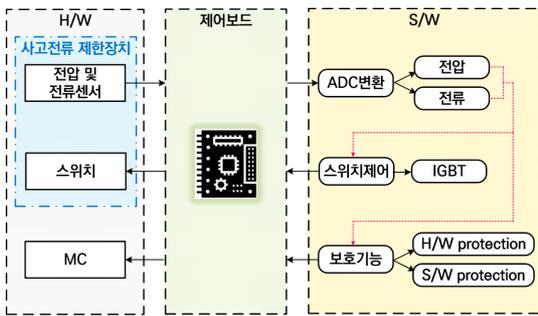
여기서,  $R_{CCR}$ : 전류제한 저항[Ω],  $v_{pri}$ : 공급 전압[V],  $k_m$ : 메인컨버터의 과부하 내량,  $i_{n,max}$ : 메인컨버터의 정격전류[A],  $R_{line}$ : 선로임피던스 저항값[Ω],  $R_{SW, stray}$ : 반도체 스위치의 기생 저항값[Ω]



[그림 4] 주 동작모드 시, 사고전류 증가회로도

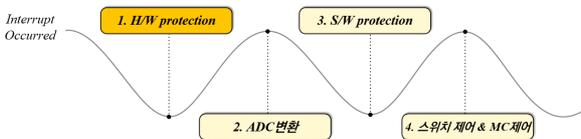
### 3.2 S/W 운용부

사고전류 제한장치를 운용하기 위한 S/W 구성도는 그림 5와 같다. 여기서, H/W 장치부의 센서를 통해 입력된 아날로그 전압 및 전류값은 S/W를 통해 디지털 신호로 변환된 후, 이 값을 바탕으로 스위치 제어와 보호기능을 수행한다.



[그림 5] 사고전류 제한장치의 S/W 구성도

또한, 스위치 제어와 전압 및 전류의 계측, 보호기능을 정확하게 수행하기 위한 인터럽트(interrupt)는 그림 6과 같다. 여기서, 사고전류 제한장치의 스위치를 우선적으로 보호해야 하므로, 보호기능의 인터럽트를 먼저 동작하도록 설정한다. 이 보호기능은 S/W방식과 H/W방식으로 분류되는데, H/W방식이 S/W보다 빠르게 동작하므로 H/W 인터럽트를 우선 순위로 설정한다. 한편, 스위치 및 MC 제어와 S/W 보호기능의 인터럽트는 메인 및 전류제한 스위치의 동작속도를 고려하여 우선순위를 설정한다.

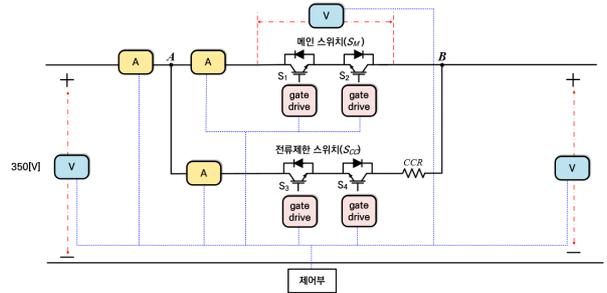


[그림 6] 인터럽트 설정 개념도

## 4. 350V DC 선로용 4kW급 사고전류 제한장치의 구현

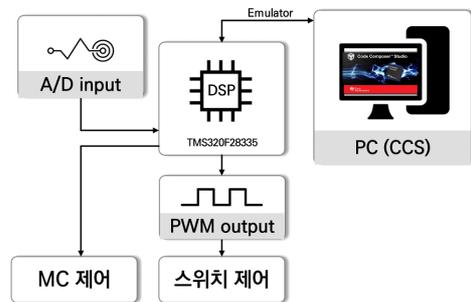
사고전류 제한장치의 H/W 구성도는 그림 7과 같이, 메인 및 전류제한 스위치, 전압센서, 전류센서, SMPS 등으로 구성된다. 여기서, 전압센서는 1차측, 2차측, 메인 스위치 양단 전

압을 측정하고, 전류센서는 1차측, 주 통전부, 전류제한 부의 전류를 측정한다. 또한, 게이트드라이브 소자는 사고전류 제한장치 주회로에 있는 메인 및 전류제한 스위치에 신호를 전달하여, 사고전류 제한장치의 스위칭동작을 제어하고, SMPS는 전압센서와 게이트드라이브 소자에 전원을 공급해준다. 한편, 터미널을 통해 제어보드로 전압 및 전류값과 각종 신호를 전달한다.



[그림 7] 사고전류 제한장치의 H/W 구성도

한편, S/W 시스템은 제어 및 통신을 하는 제어보드와 CCS(code composer studio) 프로그램을 사용해서 구현한다. 여기서, DSP TMS320F28335를 이용한 사고전류 제한장치 제어보드의 구성도는 그림 8과 같이 나타낼 수 있다. 이때, PWM포트는 사고전류 제한장치의 스위치모듈 턴-온/오프 동작을 위해 사용되며, ADC채널은 사고전류 제한장치 내의 센서로부터 입력된 전압 및 전류를 디지털 신호로 변환한다. 또한, 외부 장치와 통신을 위한 통신포트는 PC로 각종 정보를 제공하는 기능을 수행한다. 한편, DSP에서 출력된 릴레이 제어 동작신호는 제어보드를 통해 전자접촉기(MC)로 인가된다.



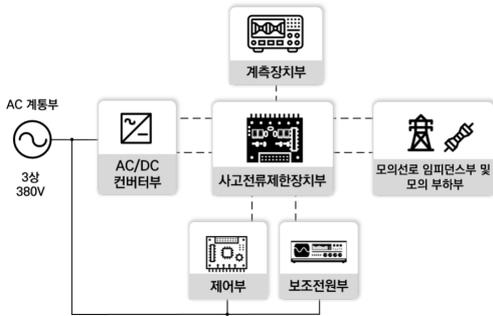
[그림 8] 사고전류 제한장치 제어보드의 구성도

## 5. 시험 결과 및 분석

### 5.1 시험조건

본 논문에서 구현한 사고전류 제한장치의 동작특성을 분석하기 위한 DC 전력망의 구성과 시험조건은 그림 9와 표 1과 같다. 여기서, 사고전류 제한장치의 사용되는 스위치 모듈은

2개, 컬렉터-에미터 내압과 사용률은 650[kV], 60[%]로 상정하며, 전류제한 저항(CCR)은 5.8[Ω]으로 상정한다. AC/DC컨버터부는 파워서플라이를 이용하여 AC 380V를 DC 350V로 공급하고, 계측 장치부는 오실로스코프를 사용하며 사고전류 제한장치부의 전원측 전압, 부하측 전압, 임피던스 전압강하, 사고전류 등을 측정한다.



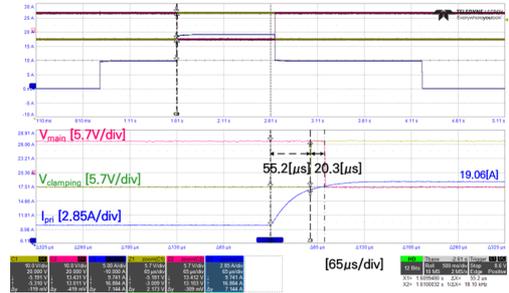
[그림 9] 사고전류 제한장치 모의시험 구성도

[표 1] 사고전류 제한장치의 특성시험조건

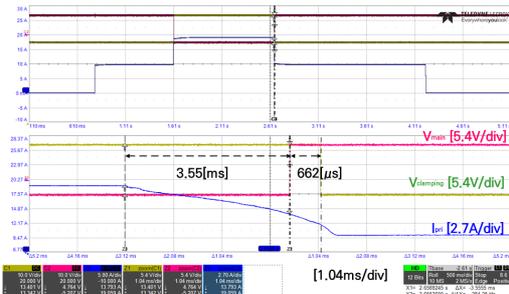
구성		내역	
사고전류 제한장치부	IGBT	모듈 수	2[개]
		컬렉터-에미터 내압	650[kV]
	전류 제한부	내압 사용률	60[%]
AC 계통부	정격용량	전류제한 저항	5.8[Ω]
	1차측 전압	10.5[kW]	
보조 전원부	공급 전압	350[V]	
	1차측 전압	12[V], 24[V]	
모의 선로 임피던스부	선종	ACSR 160[mm <sup>2</sup> ]	
모의 부하부		0.31[Ω]+1.79[mH]	
	정격 전류	10[A]	

### 5.2 사고전류 제한장치 동작특성

상기의 시험조건에 따라 선로 임피던스를 0.31 [Ω]+1.79[mH], 사고전류를 정상상태 전류의 3배로 모의하여 시험한 결과, 사고전류 제한장치의 동작특성을 나타내면 그림 10과 같다. 여기서, 그림 10(a)와 같이 사고 발생 전에서는 메인 스위치가 턴-온, 전류제한 스위치가 턴-오프 상태이고, 사고가 발생하면, 55.2[μs] 이후 전류제한 스위치가 턴-온되며, 메인 스위치와 전류제한 스위치는 20.3[μs] 동안 턴-온 상태를 유지하여, 사고전류가 19.06[A]로 제한됨을 알 수 있다. 또한, 그림 10(b)와 같이 사고구간이 분리되면 3.6[ms]이후 1차측 전류가 감소함에 따라 메인 스위치가 턴-온되고, 메인 스위치와 전류제한 스위치는 662[μs]동안 동시에 턴-온 상태를 유지함을 알 수 있었다. 따라서, 본 논문에서 구현한 사고전류 제한장치를 사용하면, 사고전류를 일정한 값으로 제한할 수 있음을 알 수 있다.



(a) 사고 발생 시 사고전류 제한장치의 동작특성



(b) 사고구간 분리 후 사고전류 제한장치의 동작특성

[그림 10] 사고전류 제한장치의 동작 특성

## 6. 결론

본 논문에서는 LVDC 배전계통에서 사고가 발생하는 경우 정전구간을 최소화하기 위하여, 사고전류를 제한할 수 있는 350V DC 선로용 4kW급 사고전류 제한장치를 설계하고 구현한다. 이를 바탕으로, 사고전류 제한장치의 동작특성을 분석하기 위하여 모의 시험을 수행한 결과, LVDC 배전계통에서 사고가 발생하는 경우, 사고전류 제한장치가 사고전류(정상상태의 3배 전류)를 19.06[A]로 제한함을 확인할 수 있었다. 따라서, 사고전류 제한장치의 스위칭 동작을 통해 사고구간을 판별하고 분리시킬 수 있는 시간을 확보하여, 메인 컨버터의 탈락을 방지하고 LVDC 배전계통에 전력을 안정적으로 공급할 수 있음을 알 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20206910100090, No.20213030160080)로서, 관계부처에 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] 한병길, “방사형 MVDC 배전계통에서 사고구간 분리를 위한 제한 장치의 구성 및 동작 특성에 관한 연구”, 전기학회논문지, 70(8), 1146-1155P, 2021.08