

LVDC 배전계통용 300W급 지능형 사고구간 분리장치의 설계 및 구현

이나경*, 김윤호*, 최형석**, 노성은*, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과

** (주)티팩토리

e-mail: naku9908@koreatech.ac.kr

A Design and Implementation of 300W Scaled Intelligent Fault Isolation Device in LVDC Distribution System

Na-Kyung Lee*, Yun-Ho Kim*, Hyoung-Seok Choi**, Seong-Eun Rho*, Dae-seok Rho*

*Korea University of Technology and Education, **Technology Factory

요약

LVDC 배전계통에서 사고가 발생할 경우, 기존 AC 배전계통에 비해 사고전류가 매우 가파르게 상승하게 되어, 메인 컨버터가 내장된 소자를 보호하기 위하여 탈락하여 수용가에 정전을 유발시킬 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 LVDC 배전계통에서 사고에 의한 메인컨버터의 탈락을 방지하기 위하여, 사고전류를 제한시킬 수 있는 LVDC 선로용 300W급 지능형 사고구간 분리장치를 구현한다. 이 장치는 H/W부와 S/W부 등으로 구성되며, 동작 메커니즘은 초기 동작모드, 보조 동작모드, 주 동작모드, 회복 동작모드의 4가지 모드로 운용된다. 여기서, H/W부는 MOSFET과 전류제한 저항, 센서 등을 이용하여 주 통전부와 전류 제한부를 구성하고, S/W부는 CCS(code compose studio) 프로그램과 DSP, A/D 변환기 등을 이용하여 스위치의 제어를 수행한다. 상기에서 제시한 지능형 사고구간 분리장치의 동작 특성을 분석한 결과, 100V DC 계통에서 사고가 발생한 경우 지능형 사고구간 분리장치가 사고전류를 신속하게 제한하여 사고구간을 분리할 수 있는 시간을 확보할 수 있고, 이를 통하여 메인컨버터의 탈락을 방지하여 LVDC 배전계통의 정전을 최소화시킬 수 있음을 알 수 있다.

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[1]. 따라서, 본 논문에서는 소규모 DC 배전계통에서 사고에 의한 메인컨버터의 탈락을 방지하기 위하여, 사고전류를 제한시킬 수 있는 LVDC 선로용 300W급 지능형 사고구간 분리장치를 구현한다. 이 장치는 H/W 부와 S/W부 등으로 구성되며, 4가지 동작모드를 바탕으로 사고전류를 수 ms 이내로 신속하게 제한시키며, 메인 컨버터 직하에 설치되어 운용된다. 여기서, H/W부는 MOSFET과 전류제한 저항, 센서, 등을 이용하여 주 통전부와 전류 제한부를 구성하고, S/W부는 CCS(code compose studio) 프로그램과 DSP, A/D 변환기 등을 이용하여 스위치의 제어를 수행한다. 한편, 300W급 DC 100V 배전계통에서 지능형 사고구간 분리장치의 동작특성을 분석한 결과, LVDC 배전계통에서 메인컨버터는 과부하내량을 초과하는 사고전

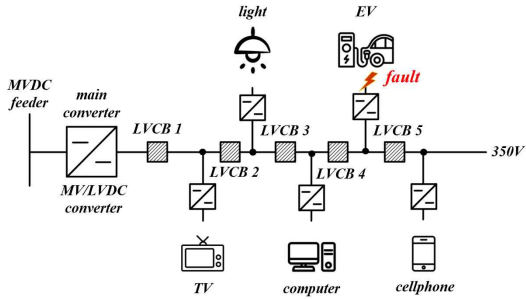
류에 의하여 급격하게 탈락할 가능성이 있지만, 지능형 사고구간 분리장치를 통해 사고전류를 일정하게 제한시키면 메인 컨버터의 보호기능이 동작하기 전에 사고구간을 분리하여 수용가의 정전을 방지시켜, 본 논문에서 구현한 지능형 사고구간 분리장치가 유효함을 알 수 있다.

2. LVDC 배전계통의 운용특성 및 지능형 사고구간 분리장치의 동작 메커니즘

2.1 LVDC 배전계통의 운용특성

소규모 DC 배전계통은 그림 1과 같이 MVDC/LVDC용 메인컨버터와 LVDC용 DC/DC 컨버터, 수 ms로 동작하는 보호기기(LVCB 1⁵) 등으로 구성된다. 이러한 DC 배전계통에서 전기자동차(EV) 측에 사고가 발생하는 경우, 메인컨버터는 과부하내량을 초과하는 사고전류에 의하여 급격하게 탈락하여 수용가에서 정전이 발생할 가능성이 있다. 즉, 메인컨버터에 내장된 보호기능(H/W, S/W)은 반도체 소자들을 보호하기 위해, 센서로부터 측정된 파라미터가 보호 범위를 벗어나면 μ s 단위로 순시적으로 동작하기 때문이다. 따라서, LVDC 배전선로에 설치된 보호기기들은 사고구간 판별과 보호협조

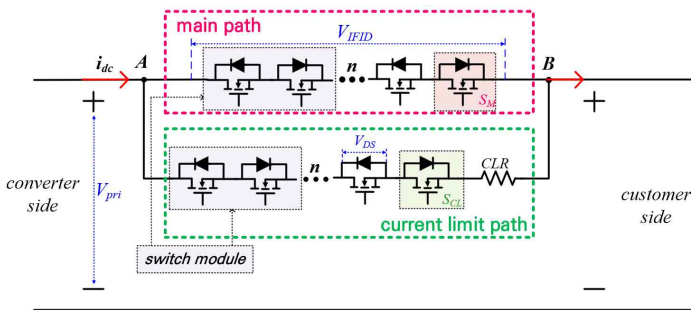
동작을 수행할 시간적인 여유가 없게 되어, 정전구간이 확대 될 가능성이 있다.



[그림 1] 소규모 LVDC 배전계통의 구성

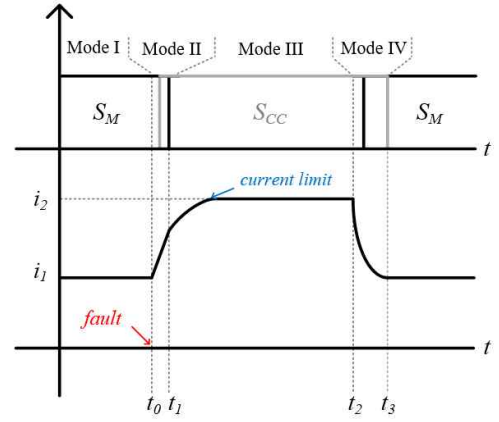
2.2 지능형 사고구간 분리장치의 구성 및 동작 메커니즘

소규모 LVDC 배전계통에서 정전구간을 최소화시키는 지능형 사고구간 분리장치는 그림 2와 같이 주 통전부(main path)와 전류 제한부(current limit path)로 구성된다. 여기서, 주 통전부는 n 개의 스위치 모듈을 직렬로 연결한 메인 스위치(S_M)로 구성되고, 전류 제한부는 전류제한 스위치(S_{CL})와 전류제한 저항(R_{CLR})으로 구성되는데, 전류 제한부는 주 통전부의 메인 스위치와 동일한 형태를 가진다. 또한, 주 통전부와 전류 제한부의 스위치는 높은 내압을 가지고 수 ms 이내에 빠르게 동작하는 소자인 반도체 스위치(MOSFET)를 채용한다.



[그림 2] LVDC 배전계통용 지능형 사고구간 분리장치의 구성

한편, 지능형 사고구간 분리장치의 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, 지능형 사고구간 분리장치가 t_1 시간대에 동작하여 사고구간이 분리되는 t_2 시간대까지 사고전류(i_{dc})를 일정한 값(i_2)으로 제한하는 것이다. 즉, MOSFET 스위칭을 통해 전류 제한부로 사고전류를 유도하여, 전류 제한부의 설치된 저항으로 사고전류를 소비시켜 메인컨버터가 탈락하지 않을 정도의 전류로 일정하게 유지시킨다.



[그림 3] 지능형 사고구간 분리장치의 동작 메커니즘

3. LVDC 배전계통용 300W급 지능형 사고구간 분리장치의 설계

3.1 H/W 장치부

지능형 사고구간 분리장치의 H/W부는 반도체 스위치와 게이트 드라이브, 전류제한 저항, 전압 및 전류센서 등으로 구성된다. 여기서, 지능형 사고구간 분리장치는 DC 배전계통의 규모, 용량, 공급전압 등을 고려한 최적의 설계가 요구되기 때문에, 스위치 개수와 전류제한 저항값과 열적용량, AD변환 설계 등에 대해 수식화한다. 먼저, 반도체 스위치 모듈 개수 (m)는 지능형 사고구간 분리장치 전압(V_{IFID})에서 MOSFET 드레인-소스 내압(V_{DS})과 스위치 내압의 사용률(k)을 나눈 값으로 산정되며, 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

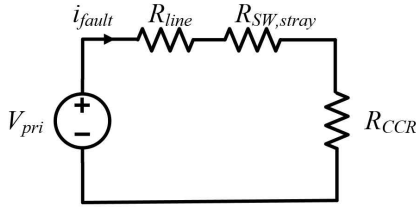
$$m = \left\lceil \frac{V_{IFID}}{2k V_{DS}} \right\rceil \quad (1)$$

여기서, m : 반도체 스위치 모듈 개수, V_{IFID} : 지능형 사고구간 분리장치 양단 전압[V], k : MOSFET 내압 사용률, V_{DS} : MOSFET 드레인-소스 내압[V]

한편, 지능형 사고구간 분리장치가 주 동작모드인 경우, 사고전류에 대한 증가회로도 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 전류제한 저항(R_{CLR})에 걸리는 전압은 선로임피던스와 반도체 스위치의 기생저항에 각각 분배된다. 따라서, 전류제한 저항값은 식 (2)와 같이 공급 전압(v_{pri})을 메인컨버터의 정격전류($i_{n,max}$)와 과부하 내량(k_m)으로 나눈 값에서 선로임피던스값(R_{line})과 반도체 스위치의 기생저항값($R_{SW,stray}$)을 뺀 값으로 산정된다.

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

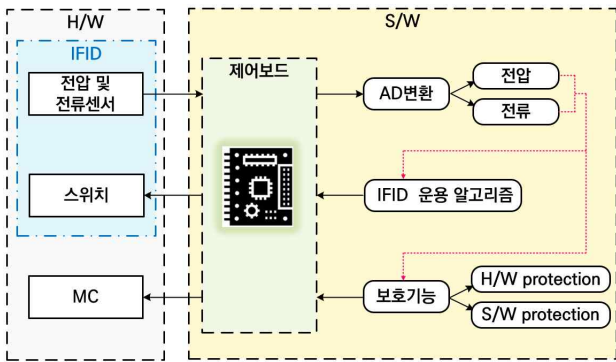
여기서, R_{CCR} : 전류제한 저항[Ω], v_{pri} : 공급 전압[V], k_m : 메인컨버터의 과부하 내량, $i_{n,max}$: 메인컨버터의 정격전류[A], R_{line} : 선로임피던스 저항값[Ω], $R_{SW, stray}$: 반도체 스위치의 기생 저항값[Ω]



[그림 4] 주 동작모드 시, 사고전류 증가회로도

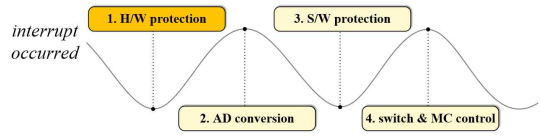
3.2 S/W 운용부

지능형 사고구간 분리장치를 운용하기 위한 S/W부는 그림 5와 같이 제어보드와 A/D변환, 스위치제어, 보호기능 등으로 구성된다. 즉, H/W부의 센서를 통해 입력된 아날로그 전압 및 전류값은 S/W부를 통해 디지털 신호로 변환된 후, 인터럽트 동작방식을 이용하여 스위치제어와 보호기능을 수행한다.



[그림 5] 지능형 사고구간 분리장치의 S/W 구성도

또한, 스위치제어와 전압 및 전류의 계측, 보호기능을 정확하게 수행하기 위한 인터럽트(interrupt)의 우선동작 순위는 그림 6과 같이 H/W부 보호와 A/D 변환, S/W부 보호, 스위치 및 MC(magnetic contactor)제어로 설정한다. 여기서, 첫 번째 인터럽트 동작은 사고구간 분리용 보호장치의 스위치를 우선적으로 보호해야 하므로 H/W 보호기능으로 정하고, 두 번째 동작은 사고전류를 신속하게 계측해야 하므로 A/D 변환기능으로 설정한다. 그리고, 세 번째 인터럽트 동작은 H/W 보호기능의 부동작을 방지하기 위하여 S/W 보호기능으로 정하고, 네 번째 동작은 계측된 전압 및 전류값과 사고구간 분리용 보호장치의 운용알고리즘을 바탕으로 스위치 및 MC의 제어기능으로 설정한다. 여기서, MC 제어는 사고구간 분리용 보호장치와 메인컨버터의 연계를 위해 사용된다.

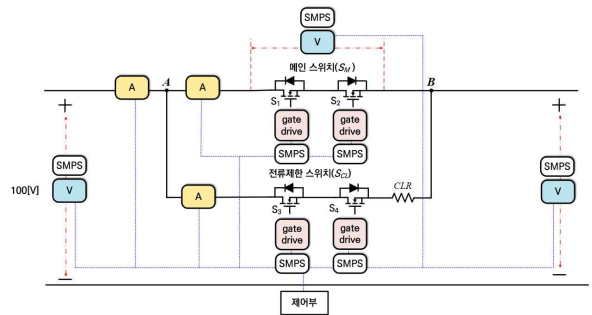


[그림 6] 인터럽트 설정 개념도

4. LVDC 배전계통용 300W급 지능형 사고구간 분리 장치의 구현

4.1 H/W 장치부

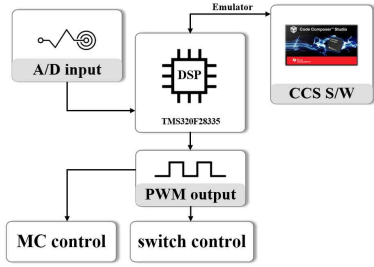
지능형 사고구간 분리장치의 H/W부는 그림 7과 같이, 메인 및 전류제한 스위치, 전류제한 저항, 전압센서, 전류센서, SMPS 등으로 구성된다. 여기서, 전류제한 스위치는 주 통전부와 전류 제한부에 대하여 각각 1개의 모듈을 적용하고, 이를 독립적으로 동작시키기 위하여 게이트 드라이브와 SMPS로 구성한다. 또한, 3개의 전압센서는 1차측과 2차측, 메인 스위치의 양단 전압을 측정하고, 3개의 전류센서는 1차측, 주 통전부, 전류 제한부의 전류를 각각 측정한다.



[그림 7] 지능형 사고구간 분리장치의 H/W 구성도

4.2 S/W 운용부

한편, S/W 운용부는 CCS(code composer studio) tool과 제어 및 통신을 담당하는 제어보드로 구성된다. 여기서, CCS는 TI의 프로세서를 위한 통합 개발 환경(IDE)이며, 반도체 소자(IGBT, MOSFET)의 실시간 제어와 디버깅 기능, 모니터링 기능을 가진다. 한편, 지능형 사고구간 분리장치의 제어보드는 그림 8과 같이, 디지털 신호 프로세서(DSP, digital signal processor)와 PWM(pulse width modulation)포트, A/D포트, 통신포트로 구성된다. 여기서, DSP는 각 소자들을 독립적으로 제어할 수 있는 TMS320F28335를 채용한다. 이 DSP는 150[MHz]의 클럭으로 동작하며, 총 12개의 PWM포트와 16개의 ADC 채널을 사용할 수 있어, 여러 개의 전압 및 전류 계측과 스위치를 동시에 제어할 수 있다. 또한, PWM포트는 지능형 사고구간 분리장치의 스위치의 turn-on/off와 MC 동작을 위해 사용되며, A/D포트는 지능형 사고구간 분리장치 내의 센서로부터 입력된 전압 및 전류를 디지털 신호로 변환시키고, 통신포트는 전압과 전류 등의 각종 정보를 전달하는 역할을 수행한다.

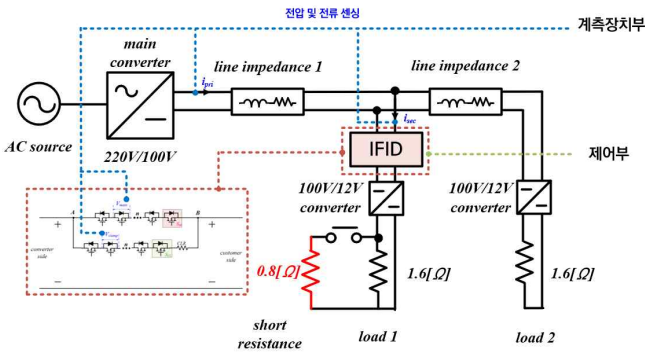


[그림 8] 지능형 사고구간 분리장치 제어보드의 구성도

5. 시험 결과 및 분석

5.1 시험조건

본 논문에서 구현한 100V, 300W급 지능형 사고구간 분리장치의 동작특성을 분석하기 위한 사고상태의 시험 구성과 시험 조건은 각각 그림 9와 표 1과 같다. 여기서, 지능형 사고구간 분리장치의 사용되는 스위치 모듈은 2개, 드레인-소스 내압과 사용률은 각각 650[V], 60[%], 전류제한 저항은 50[Ω]으로 상정한다. 또한, 메인컨버터인 AC/DC 컨버터의 용량은 300[W], 구간 컨버터인 DC/DC 컨버터의 용량은 150[W]이고, 정격효율은 90[%], 출력전압은 각각 100[V], 12[V]이다. 여기서, 수용가 부하는 100[W]로, 단락상태 부하는 300[W]로 상정한다. 한편, 선로 임피던스부의 선종은 HIV 2.5[mm²]이며, 공장은 290[m], 560[m]로 각각 2.15[Ω]+1.05[μH], 4.15[Ω]+2.02[μH]로 산정한다.



[그림 9] 지능형 사고구간 분리장치 특성시험 구성도

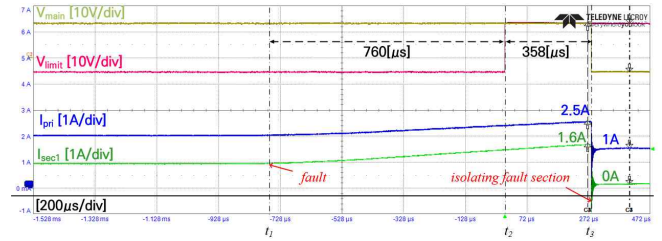
[표 1] 지능형 사고구간 분리장치의 특성시험조건

구성		내역	
지능형 사고구간 분리장치	MOSFET	모듈 수	2[개]
		드레인-소스 내압	650[V]
	전류 제한부	전류제한 저항	50[Ω]
AC/DC 컨버터	정격용량	300[W]	
	출력전압	100[V]	
DC/DC 컨버터	정격용량	150[W]	
	출력전압	12[V]	
보조 전원	공급 전압	12[V], 24[V]	
선로 임피던스	선종	HIV 2.5 [mm ²] (R:7.41[Ω/km], L:3.608[μH/km])	

수용가 부하	용량	100[W]
--------	----	--------

5.2 지능형 사고구간 분리장치 동작특성

상기의 시험 조건에 따라, 지능형 사고구간 분리장치의 동작특성을 나타내면 그림 10과 같다. 여기서, 그림 9는 그림 8의 수용가 1에서 사고가 발생할 경우, 메인컨버터 출력전류 (I_{pri})와 지능형 사고구간 분리장치의 입력전류(I_{sec1}), 메인 스위치 전압(V_{main}), 전류제한 스위치 전압(V_{limit})을 나타낸다. 즉, 그림 9의 t_1 지점에서 사고가 발생하면, 760[μs] 이후 전류제한 스위치(V_{limit})는 turn-on되고, 메인 스위치(V_{main})는 t_2 지점부터 358[μs] 이후에 turn-off된다. 이때, 지능형 사고구간 분리장치는 사고전류를 설정 목표치인 1.6[A]로 제한시킬 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 구현한 지능형 사고구간 분리장치를 통해, 3[A]의 사고전류에 대하여 53.3[%]인 1.6[A]로 신속하게 제한시켜, 과부하 내량을 초과하는 사고전류에 의한 메인컨버터의 탈락을 방지할 수 있음을 알 수 있다.



[그림 10] 지능형 사고구간 분리장치의 동작 특성

6. 결론

본 논문에서는 LVDC 배전계통에서 사고에 의한 메인컨버터의 탈락을 방지하기 위하여, 사고전류를 제한시킬 수 있는 LVDC 선로용 300W급 지능형 사고구간 분리장치를 구현한다. 또한, 제안한 장치를 바탕으로 동작특성을 분석한 결과, 수용가에서 사고가 발생할 경우, 급격한 사고전류 증가에 의해 메인컨버터가 탈락할 가능성이 있지만, 지능형 사고구간 분리장치가 760[μs] 이내로 사고전류를 신속하게 제한시켜 사고구간을 분리할 수 있는 시간을 확보함으로써 나머지 수용가에 안정적으로 전력을 공급하여 정전을 최소화할 수 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(P0008458, 2023년 산업혁신인재성장지원사업)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