

사고전류의 경사각 특성을 고려한 LVDC 배전계통용 지능형 사고구간 분리장치의 구현에 관한 연구

김경화, 김지명, 김윤호, 이민행, 한병길, 노대석*
한국기술교육대학교 전기공학과

An Implementation of Intelligent Fault Isolation Device for LVDC Distribution System Considering Slope Characteristics of Fault Current

Kyung-Hwa Kim, Ji-Myung Kim, Yun-Ho Kim,
Min-Haeng Lee, Byeong-Gill Han, Dae-Seok Rho*
Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약 DC 배전계통에서 사고가 발생하는 경우, 메인 컨버터의 급속한 탈락으로 인하여 정전구간이 확대될 가능성이 있다. 즉, 기존의 사고전류의 크기만으로는 DC 배전계통의 보호협조에 한계점이 있으므로, 사고전류의 변화분인 경사각을 고려하여 신속하게 사고구간을 분리하는 방안이 필요한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 선로 정수에 따른 사고전류의 경사각 특성을 바탕으로 신속하고 정확하게 사고를 판별할 수 있는 지능형 사고구간 분리장치의 운용방안을 제시한다. 즉, IFID는 선로 정수를 고려하여 전류의 경사각을 산정하고, 이 값이 정정치를 초과하는 경우 사고로 판별하고 신속하게 사고전류를 제한시켜 IFID의 동작시간을 단축시킨다. 또한, 상기에서 제시한 IFID의 운용방안을 바탕으로 H/W 장치부와 S/W장치부로 구성된 4kW, DC 350V급 IFID를 구현한다. 여기서, H/W 장치부는 메인 및 전류제한 스위치, 전류제한 저항, 전압센서, 전류센서, SMPS 등으로 이루어지고, S/W 장치부는 사고전류의 경사각을 실시간으로 측정하고 반도체 소자를 제어하는 CCS와 제어 및 통신을 위한 제어보드로 구성된다. 이를 바탕으로 운용방안에 따른 IFID의 동작특성을 분석한 결과, 사고전류의 경사각 특성을 고려한 IFID가 사고전류의 크기만을 고려한 IFID보다 신속하고 정확하게 사고를 판별하고 사고전류를 제한시킬 수 있음을 알 수 있다.

Abstract When a fault occurs in a DC distribution system, the outage area may be extended due to rapid shutdown of the main converter. Because the magnitude of fault current has a limit to protect coordination in a DC distribution system, an operation method is required to rapidly isolate a fault section by considering slope characteristics of the fault current. Therefore, this paper proposes an operation method for an intelligent fault isolation device (IFID), which can detect and estimate a fault in a rapid and accurate way by considering slope characteristics of the fault current with distribution line constants. The proposed operation method for an IFID calculates the slope of the fault current with distribution line constants and reduces its operation time by comparing the calculated slope value to a setting value to detect and evaluate the fault condition. Moreover, we implemented a DC 350-V, 4-kW-scale IFID consisting of H/W and S/W sections based on the proposed operation method. The H/W section is composed of main and current limit switches, a current limit resistor, voltage and current sensors, and an SMPS. The S/W section consists of a control board and CCS to calculate the slope characteristics of the fault current and control a semiconductor device. From the test results based on the proposed operation method, it was confirmed that the IFID considering slope characteristics of the fault current can detect and evaluate the fault condition and limit the fault current faster than an existing method that considers the fault current only.

Keywords : Intelligent Fault Isolation Device, Slope Characteristics, LVDC Distribution System, Protection Coordination, Implementation, Etc.

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 선형 융합연구사업(No.CPS22131-120)과 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(2022400000160, DC 그리드 에너지 혁신연구센터).

*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)

email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received October 10, 2023

Revised October 26, 2023

Accepted November 3, 2023

Published November 30, 2023

1. 서론

최근, 신재생에너지 전원의 도입 및 DC 부하의 증가, 고품질, 고신뢰성의 요구 등으로, DC 배전계통에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다[1-4]. 또한, 기존 AC 배전계통을 DC 배전계통으로 대체하여 전력을 공급할 경우, 에너지 손실 감소, 분산 전원의 수용성 향상 등의 장점이 있어, DC 배전계통에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[5,6]. 그러나, DC 배전계통에서 사고가 발생하는 경우, 메인 컨버터의 급속한 탈락으로 인하여 정전구간을 확대시키는 문제점이 발생할 가능성이 있다. 즉, 기존의 사고전류의 크기만을 고려하여 DC 배전계통의 보호협조를 수행하는데 있어서 한계점이 있으므로, 사고전류의 변화분인 경사각을 고려하여 신속하게 사고구간을 분리하는 방안이 요구되고 있다[7,8]. 따라서, 본 논문에서는 선로 정수에 따른 사고전류 경사각 특성을 바탕으로, 사고를 신속하고 정확하게 판단하여 정전구간을 최소화하는 지능형 사고구간 분리장치(intelligent fault isolation device, IFID)의 운용 방안을 제시한다. 즉, IFID는 해당 구간의 선로 정수를 고려하여 전류의 경사각을 산정하고, 이 값이 정정치를 초과하면 사고로 판별하여, 사고전류의 크기만을 고려한 경우보다 신속하게 사고전류를 제한시킨다.

또한, 본 논문에서는 상이에서 제시한 운용방안을 바탕으로 4kW, DC 350V급 IFID를 구현한다. 이 장치는 H/W부와 S/W부로 구성되며, H/W부는 메인 및 전류제한 스위치, 전류제한 저항, 전압센서, 전류센서, SMPS 등으로 구성된다. 또한, S/W부는 CCS(code composer studio) tool과 제어 및 통신을 담당하는 제어보드로 구성되며, 여기서 CCS는 본 논문에서 제시한 IFID의 운용방안을 바탕으로, 사고전류의 경사각 특성을 이용하여 신속하게 동작모드를 전환시켜 사고전류를 제한하도록, 메인 및 전류제한 스위치를 제어하는 역할을 수행한다. 이 장치를 바탕으로 운용방안에 따른 IFID의 동작특성을 분석한 결과, 사고전류의 경사각 특성을 고려한 IFID는 사고전류의 크기만을 고려한 IFID보다 최대 198[μs] 정도 신속하게 사고를 판별하고 보조 및 주 동작모드로 전환하여 사고 전류를 제한시켜, 본 논문에서 제시한 운용방안이 유효함을 알 수 있었다.

2. LVDC 배전계통의 사고전류 경사각 특성

저압직류(low voltage direct current, LVDC) 배전

계통에서 사고가 발생하는 경우, 사고전류의 크기와 경사각은 사고지점까지의 선로정수와 부하의 크기에 따라 서로 다른 특성을 가지게 된다[9]. Fig. 1은 사고지점에 따른 사고전류 특성을 나타낸 것으로, Fig. 1의 (a) 곡선과 (b) 곡선은 각각 LVDC 배전선로의 직하지점과 말단 지점에서 사고가 발생한 경우를 나타낸다. 여기서, Fig. 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, Fig. 1의 (b) 곡선과 같이 말단사고의 경우에는 선로가 가지는 큰 임피던스 성분에 의해 (a) 곡선보다 상대적으로 작은 사고전류가 흐르고, 그 변화분은 적게 된다.

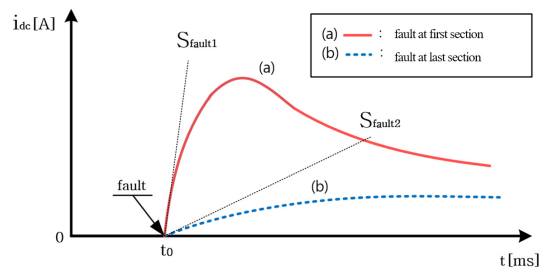


Fig. 1. Fault current characteristics with fault location

또한, Fig. 2는 부하크기에 따른 사고전류 특성을 나타낸 것으로, (a) 곡선과 (b) 곡선은 무부하와 피크부하의 사고전류 특성을 나타낸 것이다. 여기서, Fig. 2의 (a) 곡선과 같이, 무부하시 사고전류의 변화분은 초기에 크게 나타나고, (b) 곡선과 같이 피크부하시 사고전류의 변화분은 초기에 작은 값을 가진다. 즉, 무부하시 사고전류의 경사각은 크고, 피크부하시 사고전류의 경사각은 작은 값을 가진다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 선로 정수 및 부하크기에 따른 사고전류 경사각 특성을 바탕으로, 사고를 신속하고 정확하게 판단하여 정전구간을 최소화하는 IFID의 운용 방안을 제시한다.

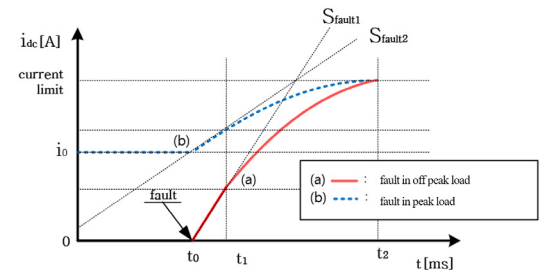


Fig. 2. Fault current characteristics with magnitude of load

3. 사고전류 경사각 특성을 고려한 IFID의 운용방안

3.1 LVDC 배전계통용 IFID의 동작 메커니즘

LVDC 배전계통에서 정전구간을 최소화시키는 IFID는 Fig. 3과 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 채용하며, 스위치 모듈은 전류를 양방향으로 제어하기 위하여 2개 스위치의 에미터를 공통으로 접속한다.

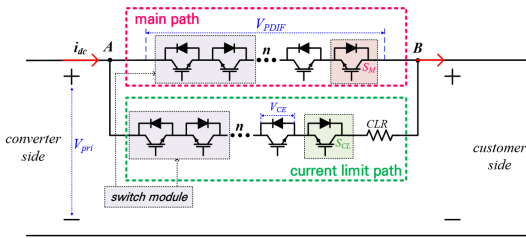


Fig. 3. Configuration of IFID

한편, IFID의 동작 메커니즘은 Fig. 4와 같이 초기 동작 모드, 보조 동작 모드, 주 동작 모드, 회복 동작 모드로

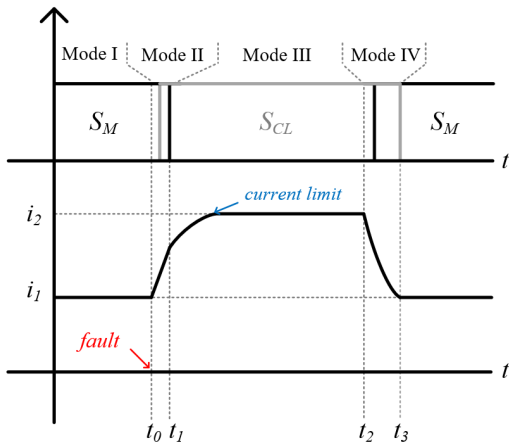


Fig. 4. Operation mechanism of IFID

나눌 수 있다. 여기서, 주 동작모드의 전류 제한 개념은 t_0 에서 사고가 발생한 경우, IFID가 t_1 시간대에 동작하여 사고구간이 분리되는 t_2 시간대까지 사고전류(i_{dc})를 일정한 값(i_2)으로 제한하는 것이다[10]. 즉, MOSFET 스위칭을 통해 전류 제한부로 사고전류를 유도하여, 전류 제한부의 설치된 저항으로 사고전류를 소비시켜 메인컨버터가 탈락하지 않을 정도의 전류로 일정하게 유지시킨다.

3.2 사고전류 경사각 특성을 고려한 IFID의 운용 방안

DC 배전계통에서 사고가 발생하는 경우, 메인 컨버터의 급속한 탈락으로 인하여 정전구간이 확대될 가능성이 있다. 따라서, 기존의 사고전류의 크기만으로는 DC 배전계통의 보호협조에 한계점이 있으므로, 사고전류의 변화분인 경사각을 고려하여 더 빠른 시간내에 사고구간을 분리하는 방안이 필요한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 2장에서 제시한 LVDC 배전계통의 사고전류 경사각 특성을 바탕으로 IFID의 운용방안을 제안한다. 먼저, 사고의 발생 유·무를 판별하기 위한 각 구간의 선로 임피던스를 고려한 사고전류의 경사각($S_{fault}(n)$)은 Eq. (1)과 같이 산정할 수 있다. 여기서, $S_{fault}(n)$ 는 n 번 구간에서 선로 정수에 따른 사고전류의 변화분($\Delta I_{fault}(n)$)을 고려하여 산정한다.

$$S_{fault}(n) = \frac{\Delta I_{fault}(n)}{\Delta t} \quad (1)$$

where, $S_{fault}(n)$: slope characteristics of fault current in zone n [kA/s], $\Delta I_{fault}(n)$: variation of fault current in zone n [kA], n : zone number

상기의 Eq. (1)을 바탕으로 LVDC 배전계통에서의 각 구간별 IFID의 제어신호($Z(n)$)는 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다. 즉, $S_{fault}(n)$ 이 정정치($S_{set}(n)$)보다 큰 경우, n 번 구간에서 사고가 발생한 것으로 판별하고, 해당 구간 IFID의 동작모드에서 이 제어신호에 따라 사고전류를 제한시킨다.

$$Z(n) = \begin{cases} 1 & \text{if } S_{fault}(n) > S_{set}(n) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

where, $Z(n)$: operation signal of IFID in zone n

따라서, 상기에서 제시한 사고전류의 경사각 특성을 고려한 LVDC 배전계통의 IFID 운용방안은 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다. 예를 들어, Fig. 5의 2번 구간에서 사고가 발생하면, 사고전류의 경사각 특성을 이용하여 신속하게 IFID(2)를 동작시켜, 메인컨버터가 동작하지 않을 정도의 크기로 사고전류를 제한하여, 구간컨버터가 탈락할 수 있는 시간을 확보하는 동시에 전체 구간의 사고 파급을 최소화시킨다.

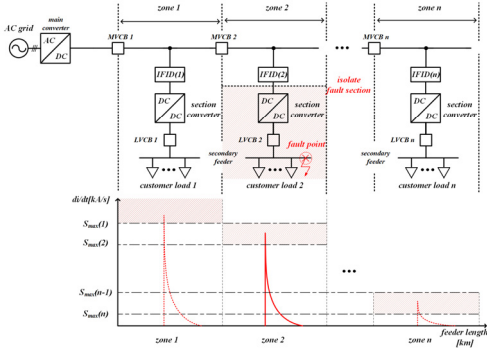


Fig. 5. Operation method of IFID with slope characteristics of fault current

구체적으로, 사고전류의 크기만을 고려한 경우와 경사각을 고려한 경우의 IFID의 동작 특성을 나타내면 Fig. 6과 같다. 여기서, 사고전류의 크기만을 고려한 경우, 사고전류의 크기가 설정치(I_{set})에 도달하는 β 지점에서 사고 발생 유·무가 판별되고, IFID가 보조 및 주 동작모드로 전환된다. 그러나, 본 논문에서 제시한 사고전류의 경사각 특성을 고려하면, 사고전류 경사각($S_{fault}(n)$)이 정정치($S_{set}(n)$)를 초과하는 α 지점에서 사고를 판별하여 부하전류 크기만을 고려하는 경우보다 신속하게 사고전류를 제한시켜 IFID의 동작시간을 단축시킨다.

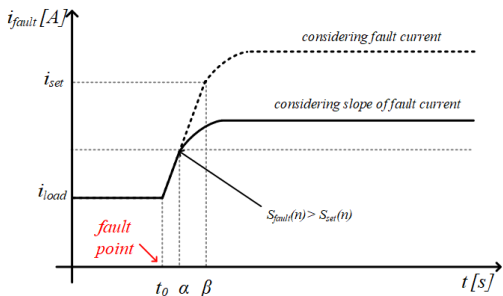


Fig. 6. Operation characteristics of IFID by existing and proposed methods

4. 4kW, DC 350V급의 IFID의 구현

4.1 H/W 장치부

4kW, DC 350V급 IFID의 H/W 장치부는 Fig. 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.

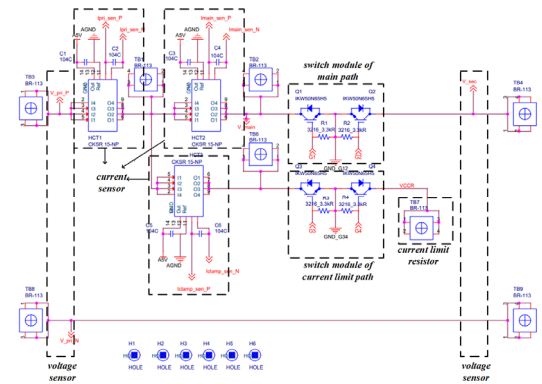


Fig. 7. Configuration of IFID

한편, 사고구간 분리용 보호장치가 주 동작모드인 경우, 사고전류에 대한 증가회로도는 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 전류제한 저항(R_{CLR})에 걸리는 전압은 선로임피던스와 반도체 스위치의 기생저항에 각각 분배된다. 따라서, 전류제한 저항값은 Eq. (3)과 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[11].

$$R_{CLR} = \frac{v_{pri}}{k_m \times i_{n,max}} - R_{line} - R_{SW, stray} \quad (3)$$

where, R_{CLR} : current limit resistor [Ω], v_{pri} : system voltage [V], k_m : margin of main converter, $i_{n,max}$: rated current of main converter [A], R_{line} : line impedance [Ω], $R_{SW, stray}$: stray resistor of the semiconductor switch [Ω]

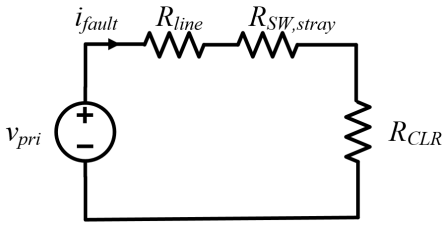


Fig. 8. Equivalent circuit of fault current in main operation mode

4.2 S/W 장치부

S/W 장치부는 CCS(code composer studio) tool과 제어 및 통신을 담당하는 제어보드로 구성된다. 여기서, CCS는 TI의 프로세서를 위한 통합 개발 환경(IDE)으로, 반도체 소자(IGBT, MOSFET)의 실시간 제어와 디버깅 기능, 모니터링 기능을 가진다. 또한, CCS는 3.2절에서 제시한 IFID의 운용방안을 바탕으로, 사고전류의 경사각 특성을 이용하여 신속하게 동작모드를 전환하고 사고전류를 제한하도록 메인 및 전류제한 스위치를 제어하는 역할을 수행한다. 즉, 전류센서에서 수집한 전류의 크기를 한 사이클(10 μ s)마다 전류의 변화량과 경사각을 도출한다. 여기서, 산정한 경사각의 크기가 설정한 기준치를 초과하면, 사고가 발생한 것으로 판별하여 IFID의 보조 및 주 동작모드로 전환시킨다. 한편, 사고구간 분리용 보호장치의 제어보드는 Fig. 9와 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[12]. 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,

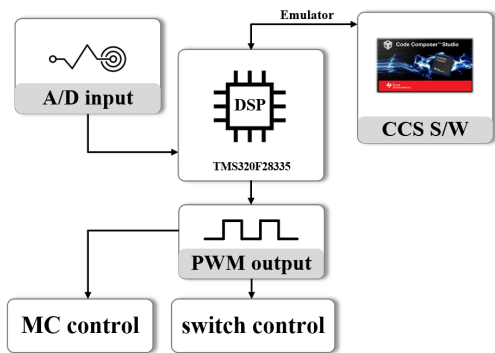


Fig. 9. Configuration of control board in IFID

PWM포트는 사고구간 분리용 보호장치의 스위치의 turn-on/off와 MC 동작을 위해 사용되며, A/D포트는 사고구간 분리용 보호장치 내의 센서로부터 입력된 전압 및 전류를 디지털 신호로 변환시키고, 통신포트는 전압과 전류 등의 각종 정보를 전달하는 역할을 수행한다.

5. 시험 결과 및 분석

5.1 시험 조건

본 논문에서 제시한 경사각 특성을 고려한 IFID의 운용 특성을 분석하기 위한 시험조건은 Table 1과 같다. 여기서, IFID에 사용되는 MOSFET 스위치 모듈은 드레인-소스 내압과 사용률을 고려하여 2개로 상정하고, 전류제한 저항(R_{CLR})은 5.8[Ω], AC계통부의 출력전압은 단상 220[V]로 상정한다. 한편, 메인컨버터부는 20[kW] 용량의 AC/DC 컨버터로 구성하고, 입력 및 출력측 전압은 각각 220[V_{ac}], 350[V_{dc}]이다. 또한, 모의선로 임피던스는 고압선로의 축소형 모델로 두 가지의 Case를 고려한다.

Table 1. Test conditions

items		contents
intelligent fault isolation device	type	MOSFET
	number of modules[EA]	2
	drain-source breakdown voltage[V]	650
	load factor of insulation voltage[%]	60
	turn-on delay time[ns]	20
	turn-off delay time[ns]	82
	current limit resistor[Ω]	5.8
AC grid	rated voltage[V _{ac}]	220
main converter	rated capacity[kW]	20
	input voltage[V _{ac}]	380
	output voltage[V _{dc}]	350
line impedance	Case I	624.9[m Ω]+j3.571[mH]
	Case II	937.3[m Ω]+j5.356[mH]

5.2 사고전류 경사각 특성을 고려한 IFID의 운용 특성

상기에서 제시한 시험 조건에 따라, Case I의 선로 임피던스를 바탕으로 사고전류의 크기만을 고려한 IFID의 동작 특성은 Fig. 10과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Fig. 10의 ①번, ②번, ③번 그래프는 main path의 게이트 드라이브 전압, 메인 컨버터 2차측에 흐르는 전류의 크기, current limit path의 게이트 드라이브 전압을 각각 나타낸다. 이 그림에서와 같이, t_1 지점에서 사고가 발생하면 IFID는 약 223.2[μ s] 이후에 보조 동작모드로 전환되어 current limit path를 turn-on 시키고, t_2 지점부터 약 30.5[μ s] 이후에 주 동작모드로 전환되어 main path를 차단한다. 따라서, 사고전류의 크기만을 고려하는 경우, IFID는 사고발생 이후 약 253.7[μ s] 이후에 사고전류를 제한시킬 수 있음을 알 수 있다.

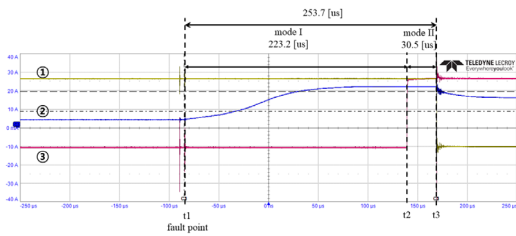


Fig. 10. Operation characteristics of existing IFID (Case I)

한편, 상기에서 제시한 시험 조건에 따라, Case I의 선로 임피던스를 바탕으로 사고전류의 경사각을 고려한 IFID의 동작특성은 Fig. 11과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Fig. 11의 ①번, ②번, ③번 그래프는 main path의 게이트 드라이브 전압, 메인 컨버터 2차측에 흐르는 전류의 크기, current limit path의 게이트 드라이브 전압을 각각 나타낸다. 이 그림에서와 같이, t_1 지점에서 사고가 발생하면 IFID는 약 35.4[μ s] 이후에 보조 동작모드로 전환되어 current limit path를 turn-on 시키고, t_2 지점부터 약 20.1[μ s] 이후에 주 동작모드로 전환되어 main path를 차단한다. 따라서, 사고전류의 경사각을 고려하는 경우, IFID는 사고발생 이후 약 55.5[μ s] 이내에 사고전류를 제한시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한, 사고전류의 경사각 특성을 고려한 IFID는 사고전류의 크기만을 고려한 IFID보다 198[μ s] 정도 신속하게 사고의 발생 유·무를 판별하고 보조 및 주 동작모드로 전환하여 사고전류를 제한시킬 수 있음을 알 수 있다.

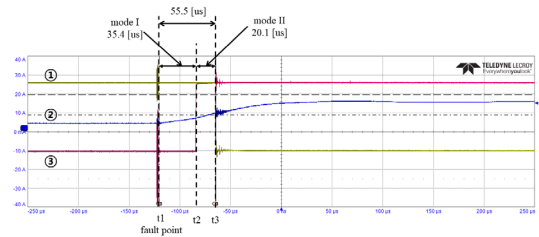


Fig. 11. Operation characteristics of proposed IFID (Case I)

한편, 상기에서 제시한 시험 조건에 따라, Case II의 선로 임피던스 조건을 바탕으로 사고전류의 크기만을 고려한 IFID의 동작 특성은 Fig. 12와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Fig. 12의 ①번, ②번, ③번 그래프는 main path의 게이트 드라이브 전압, 메인 컨버터 2차측에 흐르는 전류의 크기, current limit path의 게이트 드라이브 전압을 각각 나타낸다. 이 그림에서와 같이, t_1 지점에서 사고가 발생하면 IFID는 약 203[μ s] 이후에 보조 동작모드로 전환되어 current limit path를 turn-on 시키고, t_2 지점부터 약 30.1[μ s] 이내에 주 동작모드로 전환되어 main path를 차단한다. 따라서, 사고전류의 크기만을 고려하는 경우, IFID는 사고발생 이후 약 233.1[μ s] 이내에 사고전류를 제한시킬 수 있음을 알 수 있다.

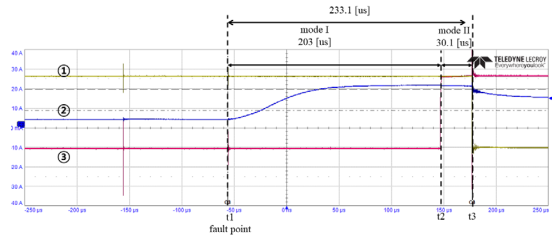


Fig. 12. Operation characteristics of existing IFID (Case II)

한편, 상기에서 제시한 시험 조건에 따라, Case II의 선로 임피던스 조건을 바탕으로 사고전류의 경사각을 고려한 IFID의 동작특성은 Fig. 13과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Fig. 13의 ①번, ②번, ③번 그래프는 main path의 게이트 드라이브 전압, 메인 컨버터 2차측에 흐르는 전류의 크기, current limit path의 게이트 드라이브 전압을 각각 나타낸다. 이 그림에서와 같이, t_1 지점에서 사고가 발생하면 IFID는 약 31.2[μ s] 이내에 보조 동작모드로 전환되어 current limit path를 turn-on 시키고, t_2 지점부터 약 19.7[μ s] 이내에 주 동작모드로 전

환되어 main path를 차단한다. 따라서, 사고전류 경사각을 고려하는 경우, IFID는 사고발생 이후 약 50.9[us] 이내에 사고전류를 제한시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한, 사고전류의 경사각 특성을 고려한 IFID는 사고전류의 크기만을 고려한 IFID보다 182[us] 정도 신속하게 사고의 발생 유·무를 판별하고 보조 및 주 동작모드로 전환하여 사고전류를 제한시킬 수 있음을 알 수 있다.

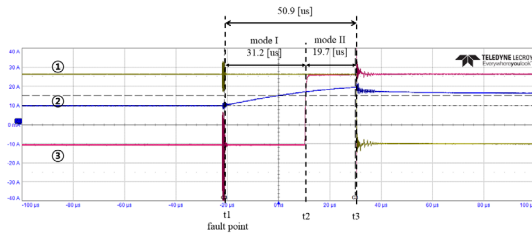


Fig. 13. Operation characteristics of proposed IFID (Case II)

6. 결론

본 논문에서는 선로 정수 및 부하크기에 따른 사고전류의 경사각 특성을 바탕으로, 사고전류의 크기만을 고려하는 경우보다 신속하게 사고구간을 판별하고 사고전류를 제한하는 IFID의 운용방안을 제시한다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) Case I의 선로 임피던스 조건에 대하여, 사고전류의 크기만을 고려한 IFID는 사고발생 이후 약 253.7[us] 이후에 사고전류를 제한시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한, Case II의 선로 임피던스 조건에 대하여 사고전류의 크기만을 고려한 IFID는 사고발생 이후 약 233.1[us] 이후에 사고전류를 제한시킬 수 있음을 알 수 있다.
- (2) Case I의 선로 임피던스 조건에 대하여, 사고전류의 경사각 특성을 고려한 IFID는 사고발생 이후 약 55.5[us] 이내에 사고전류를 제한시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한, Case II의 선로 임피던스 조건에 대하여, 사고전류의 경사각 특성을 고려한 IFID는 사고발생 이후 약 50.9[us] 이내에 사고전류를 제한시킬 수 있음을 알 수 있다.
- (3) 본 논문에서 제시한 사고전류의 경사각 특성을 고려한 IFID는 사고전류의 크기만을 고려한 IFID보다 Case I에서 198[us] 정도, Case II에서 182[us]

s] 정도 신속하고 정확하게 사고의 발생 유·무를 판별하고, 보조 및 주 동작모드로 전환하여 사고전류를 제한시킬 수 있음을 알 수 있다.

References

- [1] A. P. Shah and K. J. Chudasama, "Selection of LVDC Microgrid Component for Efficient Microgrid Performance," *2021 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*, Cape Town, South Africa, pp.1-6, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICECET52533.2021.9698745>
- [2] T. Nguyen, H. Yoo, and H. Kim, "A comparison study of LVDC and MVAC for deployment of distributed wind generations," in *Proc. of 2016 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET)*, Hanoi, pp.138-141, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSET.2016.7811770>
- [3] B. Morris, G. Faheem, R. Enrico and Z. Dario, "Modeling of LVDC Distribution System: An Assessment of Control, Power Quality, and DC Faults," *2020 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Dubai, United Arab Emirates, pp.1-5, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICHQP46026.2020.9177920>
- [4] Baran, Mesut E., and Nikhil R. Mahajan. "DC distribution for industrial systems: opportunities and challenges." *IEEE transactions on industry applications*, pp.1596-1601, 2003.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2003.818969>
- [5] Chung-Guen Kwak, Byeong-Gill Han, Kyung-Hwa Kim, Ji-Myung Kim, Dae-Seok Rho, "A Study on Modeling of Transient Grounding Impedance with Grounding System in Distribution System", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.23, No.6, pp.1-9, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.6.1>
- [6] Ji-Myung Kim, Hu-Dong Lee, Dong-Hyun Tae, Dae-Seok Rho, "A Study on Fault Analysis Modeling of 5kV MV-LVDC Off-grid Micro Grid System", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.22, No.9, pp.745-753, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.9.745>
- [7] Hu-Dong Lee, Byeong-Gill Han, Ji-Myung Kim, Yun-Ho Kim, Dae-Seok Rho, "A Study on Operation Algorithm of Protection Devices in ±35kV MVDC Distribution System", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.24, No.5, pp.209-217, 2023.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.5.209>
- [8] Byeong-Gill Han, Hu-Dong Lee, Ji-Myung Kim, Sung-Moon Choi, Dae-Seok Rho, "Modeling and Fault Current Characteristics of ±35kV MVDC Distribution System Based on PSCAD/EMTDC", *Journal of the*

Korea Academia-Industrial cooperation Society,
Vol.23, No.4, pp.1-9, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.4.1>

- [9] Hu-Dong Lee, Dong-Hyun Tae, Dae-Seok Rho, Ju-Yong Kim, "A Study on Operation Algorithm for Protection Coordination in 20kV MVDC Radial Distribution System", *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol.69, No.6, pp.869-880, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2020.69.6.869>
- [10] Choon-Taek Kim, Seong-Ju Kim, Jae-Du La, Young-Seok Kim, "1-stage Asymmetrical LLC Resonant Converter with Low Voltage Stress Across Switching Devices", *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol.62, No.8, pp.1101-1107, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2013.62.8.1101>
- [11] Byeong-Gill Han, Hu-Dong Lee, Dong-Hyun Tae, Dae-Seok Rho, "Operation Characteristics and Implementation of Fault Current Clamping Device in Radial-type MVDC Distribution System", *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol.70, No.8, pp.1146-1155, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2021.70.8.1146>
- [12] Jeon Tae-won, Ahn Jung-ryul, Application and characteristics of the TMS320F280x DSP, *KIPE MAGAZINE*, Vol.13, No.1, pp15-19, 2008.

김 경 화(Kyung-Hwa Kim)

[정회원]



- 2021년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2023년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학중

<관심분야>

전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

김 지 명(Ji-Myung Kim)

[정회원]



- 2020년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2022년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2022년 3월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학중

<관심분야>

전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

김 윤 호(Yun-Ho Kim)

[준회원]



- 2022년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2022년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 석사과정 재학중

<관심분야>

배전계통 운용, 보호협조, 신재생에너지, 마이크로그리드

이 민 행(Min-Haeng Lee)

[준회원]



- 2023년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 석사과정 재학중

<관심분야>

전기저장장치, 마이크로그리드, 신재생에너지

한 병 길(Byeong-Gill Han)

[정회원]



- 2016년 2월 : 한밭대학교 전자제어공학과 (공학사)
- 2018년 8월 : 서울과학기술대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2018년 8월 ~ 2020년 4월 : 한국화학융합시험연구원 연구원

- 2020년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 박사과정 재학 중

〈관심분야〉

전력변환기, ESS, 신재생에너지, 마이크로그리드

노 대 석(Dae-Seok Rho)

[종신회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국전기연구소 연구원/선임연구원

- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

〈관심분야〉

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석