

LVDC 선로용 4kW급 사고구간 분리용 보호장치의 설계 및 구현

이나경, 한병길, 김지명, 김경화, 노대석*
한국기술교육대학교 전기공학과

A Design and Implementation of 4kW Scaled Protection Device for Isolating Fault Section in LVDC Distribution System

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

요 약 소규모 DC 배전계통에서 사고가 발생할 경우, 기존 AC 배전계통에 비해 사고전류가 매우 가파르게 상승하게 되어, 메인컨버터가 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 4kW급 사고구간 분리용 보호장치를 구현한다. 이 장치는 반도체 스위치와 게이트 드라이브, 전류제한 저항, 전압 및 전류센서로 구성된 H/W부와 TM320F28335를 기반으로 한 S/W부 등으로 구성되며, 동작 메커니즘은 초기 동작 모드, 보조 동작모드, 주 동작모드, 회복 동작모드의 4가지 모드로 운용된다. 여기서, H/W부는 IGBT(insulated gate bipolar transistor)와 전류제한 저항, 센서 등을 이용하여 주 통전부와 전류 제한부를 구성하고, S/W부는 CCS(code compose studio) 프로그램과 DSP(digital signal processor), A/D(analog/digital) 변환기 등을 이용하여 스위치의 제어를 수행한다. 상기에서 제시한 사고구간 분리용 보호장치의 동작 특성을 분석한 결과, 350V DC 계통에서 사고가 발생한 경우 사고구간 분리용 보호장치가 55.2~72.5[μ s] 이내로 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.

Abstract When a fault occurs in an LVDC distribution system, the fault region may be extended due to shutdown of the main converter to protect internal devices. Therefore, this paper presents a 4-kW scaled-protection device for isolating a fault section to limit the fault current and prevent this shutdown. The proposed device is composed of a hardware system and a software system and has four operation modes: initial mode, auxiliary mode, main mode, and restoration mode. The hardware system is composed of a main path, current limit path using an IGBT, current limit resistor, sensors, etc. The software system performs monitoring and controlling of the switches using a code composition studio (CCS) program, DSP, A/D converter, etc. From the test results based on 4-kW 350-V DC distribution, it was confirmed that the proposed protection device for isolating a fault section can limit the fault current within 55.2-72.5 [μ s] of the reference value in the LVDC distribution system and ensures isolation time for the fault section. Therefore, it is clear that the proposed device could be a useful tool to isolate a fault section by preventing shutdown of the main converter and minimizing a fault region in an LVDC distribution system.

Keywords : Fault Current, LVDC System, Protection Coordination, Protection Device for Isolating Fault Section

본 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(20213030160080, (에너지 소비대체율 50% 달성을 위한 신재생에너지기반 융복합형 마을단위 마이크로그리드 실증 기술개발과 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 실행 융합연구사업(No. CPS22131-100)의 지원을 받아 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)
email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received February 7, 2023

Revised March 14, 2023

Accepted April 7, 2023

Published April 30, 2023

1. 서론

최근, 신재생에너지 전원의 도입 및 DC 부하의 증가, 고품질, 고신뢰성의 요구 등으로, DC 배전계통에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다. 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[1-4]. 그러나, DC 배전계통에서 사고가 발생하는 경우, AC 배전계통에 비해 사고전류가 급격하게 증가하게 되어, 메인컨버터가 탈락하여 수용가에 정전이 발생할 가능성이 있다[5,6]. 즉, 이것은 전력반도체소자를 사용하는 컨버터의 특성상 내부설비를 보호하기 위하여, 수 ms 이내에 보호회로가 동작하기 때문에 보호기기간에 협조시간차를 두어 사고구간을 판별할 여유가 없어 기존 방법으로 LVDC 배전계통에서 보호협조가 어려운 실정이다[7-9].

따라서, 본 논문에서는 소규모 DC 배전계통에서 사고에 의한 메인컨버터의 탈락을 방지하기 위하여, 사고전류를 제한시킬 수 있는 LVDC 선로용 4kW급 사고구간 분리용 보호장치(protection device for isolating fault section)를 구현한다. 이 장치는 H/W 부와 S/W 부 등으로 구성되며, 4가지 동작모드를 바탕으로 사고전류를 수 ms 이내로 신속하게 제한시키며, 메인 컨버터 직하에 설치되어 운용된다[10]. 여기서, H/W부는 IGBT와 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, 4kW급 DC 350V 배전계통에서 사고구간 분리용 보호장치의 동작 특성을 분석한 결과, LVDC 배전계통에서 메인컨버터는 과부하내량을 초과하는 사고전류에 의하여 급격하게 탈락할 가능성이 있지만, 사고구간 분리용 보호장치를 통해 사고전류를 일정하게 제한시키면 메인컨버터의 보호기능이 동작하기 전에 사고구간을 분리하여 수용가의 정전을 방지시켜, 본 논문에서 구현한 사고구간 분리용 보호장치가 유효함을 알 수 있다.

2. 소규모 DC 배전계통의 운용특성 및 사고구간 분리용 보호장치의 동작 메커니즘

2.1 소규모 DC 배전계통의 운용특성

소규모 DC 배전계통은 Fig. 1과 같이 MVDC/LVDC용 메인컨버터와 LVDC용 DC/DC 컨버터, 수 ms로 동작하는 보호기기(LVCB 1~5) 등으로 구성된다[11,12]. 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 파라메타가 보호 범위를 벗어나면 수 ms 이내에 순시적으로 동작하기 때문이다[13,14]. 따라서, LVDC 배전선로에 설치된 보호기기들은 사고구간 판별과 보호협조 동작을 수행할 시간적인 여유가 없게 되어, 정전구간이 확대될 가능성이 있다.

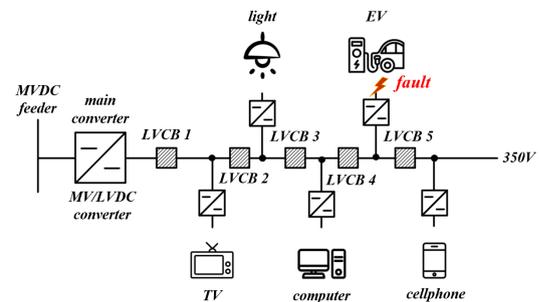


Fig. 1. Configuration of LVDC distribution system

2.2 사고구간 분리용 보호장치의 구성 및 동작 메커니즘

소규모 LVDC 배전계통에서 정전구간을 최소화시키는 사고구간 분리용 보호장치는 Fig. 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 스위치

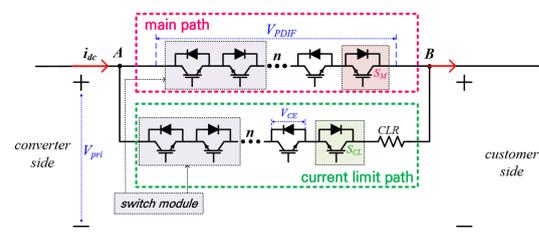


Fig. 2. Configuration of protection device for isolating fault section

와 동일한 형태를 가진다. 또한, 주 통전부와 전류 제한부의 스위치는 높은 내압을 가지고 수 ms 이내에 빠르게 동작하는 소자인 반도체 스위치(IGBT)를 채용하며, 스위치 모듈은 전류를 양방향으로 제어하기 위하여 2개 스위치의 에미터를 공통으로 접속한다.

한편, 사고구간 분리용 보호장치의 동작 메커니즘은 Fig. 3과 같이 초기 동작 모드, 보조 동작 모드, 주 동작 모드, 회복 동작 모드로 나눌 수 있다. 여기서, 주 동작 모드의 전류 제한 개념은 t_0 에서 사고가 발생한 경우, 사고구간 분리용 보호장치가 t_1 시간대에 동작하여 사고구간이 분리되는 t_2 시간대까지 사고전류(i_{dc})를 일정한 값(i_2)으로 제한하는 것이다[10]. 즉, IGBT 스위칭을 통해 전류 제한부로 사고전류를 유도하여, 전류 제한부의 설치된 저항으로 사고전류를 소비시켜 메인컨버터가 탈락하지 않을 정도의 전류로 일정하게 유지시킨다.

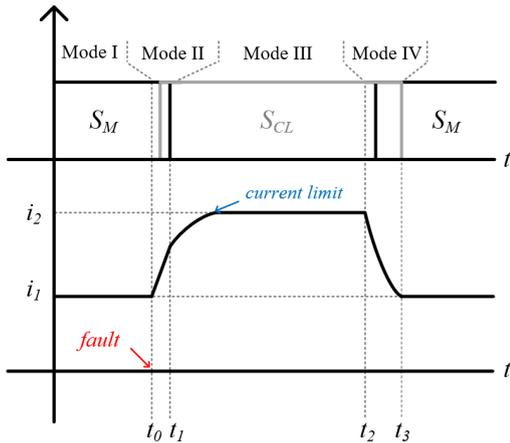


Fig. 3. Operation mechanism of protection device

3. LVDC 선로용 4kW급 사고구간 분리용 보호장치의 설계

3.1 H/W 장치부

사고구간 분리용 보호장치의 H/W부는 반도체 스위치와 게이트 드라이브, 전류제한 저항, 전압 및 전류센서 등으로 구성된다. 여기서, 사고구간 분리용 보호장치는 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 사고구간 분

리용 보호장치 전압(V_{PDIF})에서 IGBT 컬렉터-에미터 내압(V_{CE})과 스위치 내압의 사용률(k)을 나눈 값으로 산정되며, Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

where, m : number of semiconductor switch modules, V_{PDIF} : terminal voltage of protection device [kV], k : IGBT load factor of insulation voltage, V_{CE} : collect-emitter voltage of IGBT [kV]

한편, 사고구간 분리용 보호장치가 주 동작모드인 경우, 사고전류에 대한 등가회로도는 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 전류제한 저항(R_{CLR})에 걸리는 전압은 선로임피던스와 반도체 스위치의 기생저항에 각각 분배된다. 따라서, 전류제한 저항값은 Eq. (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.

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

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]

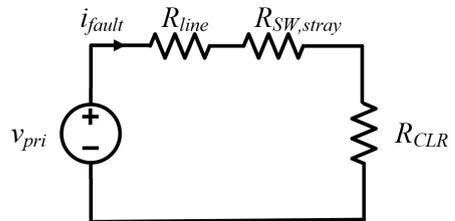


Fig. 4. Equivalent circuit of fault current in main operation mode

또한, 전류제한 저항의 열적용량을 산정하기 위한 전류제한 저항의 전압 및 전류 특성은 Fig. 5와 같다. 여기서, 전류제한 저항의 전압($v_{ds}(t)$)은 선로 임피던스를

고려하고, 전압이 인가되는 지속시간(t_{PDIF})은 전류제한 스위치가 turn-on되는 시간부터 사고구간 분리가 완료되는 시간까지이며, Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다. 따라서, 전류제한 저항의 열적용량은 Eq. (3)의 지속시간 동안 전류제한 저항의 전압과 전류의 곱을 적분하여 산정하며, Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$t_{PDIF} = t_2 - t_1 \quad (3)$$

$$E_{CLR.min} = \int_0^{t_{PDIF}} v_{ds}(t) \times i_{fault}(t) dt \quad (4)$$

where, t_{PDIF} : operation time of the current limit resistor [ms], t_1 : turn-on time of current limit switch [ms], t_2 : isolation time of fault section [ms], $E_{CLR.min}$: energy of current limit resistor [J], $v_{ds}(t)$: terminal voltage of current limit path [kV], $i_{fault}(t)$: fault current [A]

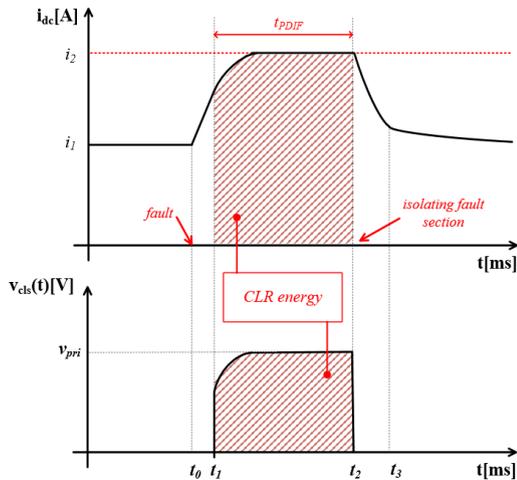


Fig. 5. Characteristics of voltage and current in current limit resistor

한편, 사고구간 분리를 위한 보호장치는 AD 변환값을 바탕으로 4가지의 동작모드를 가진 스위치 운용 알고리즘으로 동작하기 때문에, 정확한 동작을 μs 단위로 빠르게 수행하기 위해서는 AD 변환의 최적 설계가 요구된다. 따라서, 아날로그 형태의 전압 및 전류를 디지털 형태로 변환시키기 위한 개념도는 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 센서를 통해 입력된 아날로그 형태의 전압 (V_1)은 일반적인 센서들의 출력 범위(0~5[V])와 이득값

(G_1)을 고려하여 전압값으로 출력시키고, 이 값은 연산 증폭기 이득값(G_2)과 제어보드의 적정 입력전압(0~3[V])을 고려하여 V_3 값으로 변환시킨다. 이때, V_2 값은 고주파 성분을 포함하고 있으므로, Eq. (5)와 같이 1차 저역 통과필터(low pass filter)의 아날로그 회로를 채용하여 노이즈를 저감시켜 제어보드에 입력한다. 여기서, 저역 통과필터의 차단주파수는 Eq. (6)과 같이 메인컨버터(AC/DC)의 일반적인 스위칭 주파수(5~20[kHz])를 고려하여 산정한다. 따라서, 제어보드의 입력전압(V_3)은 Eq. (7)과 같이 센서와 연산증폭기의 이득 값, 저역통과 필터의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$H(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (5)$$

where, $H(s)$: transfer function of analog first-order low pass filter, τ : time constant (RC)

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_v C_v} \quad (6)$$

where, f_c : cut-off frequency [kHz], R_v : filter resistor [k Ω], C_v : filter capacitor [nF]

$$V_3 = G_1 \times G_2 \times V_1 \times H \quad (7)$$

where, G_1 : gain of sensor, G_2 : gain of op-amp, V_1 : analog voltage and current [V], H : gain of analog low pass filter, V_3 : input voltage of the control board [V]

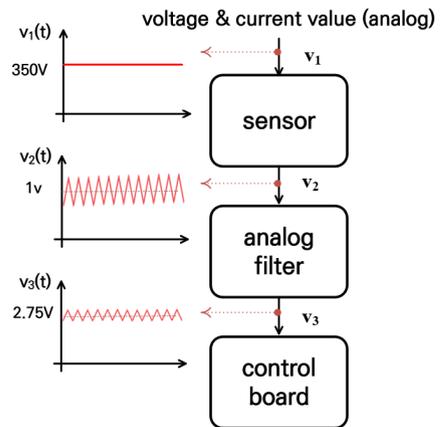


Fig. 6. Concept of digital conversion of voltage and current

구체적으로, 아날로그 형태의 전압은 Eq. (8)과 같이 저항의 전압분배법칙을 이용하여 전압센서에 입력시키며, 전압센서의 이득(G_1)에 따라 전압 형태($V_{v,scn}$)로 출력된다. 또한, 전류센서의 아날로그 전류(i_{dc})는 센서의 이득(G_2)에 따라 전압($V_{i,scn}$)형태로 출력된다. 상기의 Eq. (8)과 Eq. (9)를 바탕으로 전압 및 전류센서의 H/W 구성도는 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{v,scn} = K_1 V_1 = \frac{R_{sen}}{n \times R_{div} + R_{sen}} \times V_1 \quad (8)$$

$$V_{i,scn} = K_2 \times i_{dc} \quad (9)$$

where, $V_{v,scn}$: input voltage of voltage sensor [V], K_1 : gain of voltage sensor, V_1 : analog measurement voltage [V], R_{div} : series resistor for voltage divider [Ω], R_{sen} : measurement resistor for voltage [Ω], n : number of series resistors, P_{SMD} : rated capacity of resistor [W], $V_{i,scn}$: output voltage of current sensor [V], K_2 : gain of current sensor, i_{dc} : input current of current sensor [A]

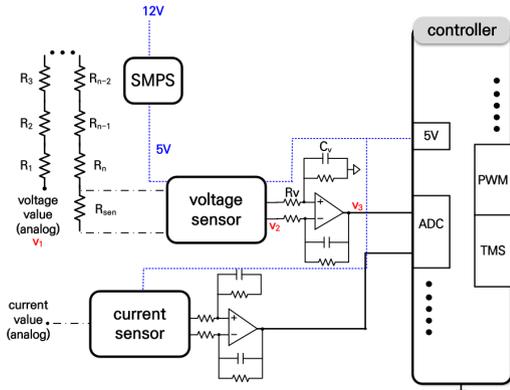


Fig. 7. H/W configuration of voltage and current sensor

3.2 S/W 운용부

사고구간 분리용 보호장치를 운용하기 위한 S/W부는 Fig. 8과 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.

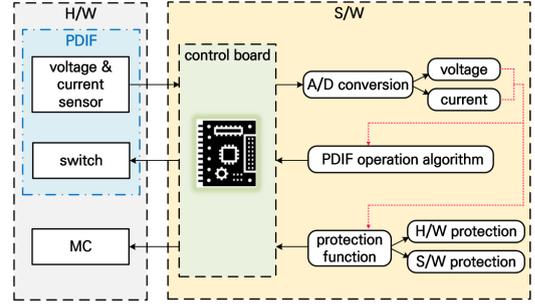


Fig. 8. S/W configuration of protection device

또한, 스위치제어와 전압 및 전류의 계측, 보호기능을 정확하게 수행하기 위한 인터럽트(interrupt)의 우선 동작 순위는 Fig. 9와 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.

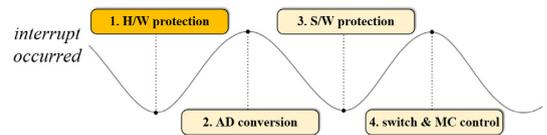


Fig. 9. Concept of interrupt setting

한편, S/W부에서 고분해능과 고속도를 위하여, 고주파 성분의 노이즈를 제거하기 위한 필터를 사용한다. 이때, 1차 디지털 저역통과필터를 채용하고, 필터의 전달함수는 Eq. (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L[z] = \frac{t_s}{\tau + t_s - \tau z^{-1}} \quad (10)$$

where, $L[z]$: transfer function of digital first-order low pass filter, τ : time constant (RC), t_s : sampling frequency

또한, 제어보드로 입력된 전압은 Eq. (11)과 같이 S/W의 샘플링을 통하여 디지털 신호로 변환되고, 이 값은 Eq. (8)과 Eq. (9)를 이용하여 Eq. (12)와 같이 원래의 값으로 복원시킨다. 즉, 제어보드로 입력된 아날로그 형태의 전압 및 전류를 디지털 값으로 환산시키기 위한 개념도는 Fig. 10과 같다.

$$G_d = \frac{2^n}{V_{controller}} \quad (11)$$

where, G_d : gain of A/D conversion, n : number of A/D conversion module, $V_{controller}$: rated voltage of control board [V]

$$V_{AD} = \frac{1}{K \times H \times L \times G_d} \times V_1 \quad (12)$$

where, V_{AD} : digital conversion voltage [V], V_1 : analog measurement voltage [V], K : gain of voltage and current sensors, H : gain of analog low pass filter, L : gain of digital low pass filter, G_d : gain of A/D conversion

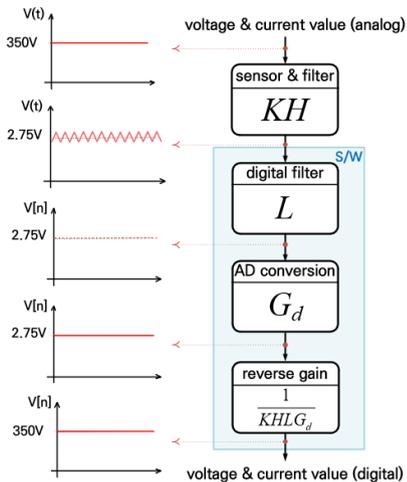


Fig. 10. Concept of digital conversion of voltage and current in S/W system

4. LVDC 선로용 4kW급 사고구간 분리용 보호장치의 구현

4.1 H/W 장치부

사고구간 분리용 보호장치의 H/W부는 Fig. 11과 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. 이를 바탕으로 사고구간 분리용 보호장치의 H/W를 구현하면 Fig. 12와 같다.

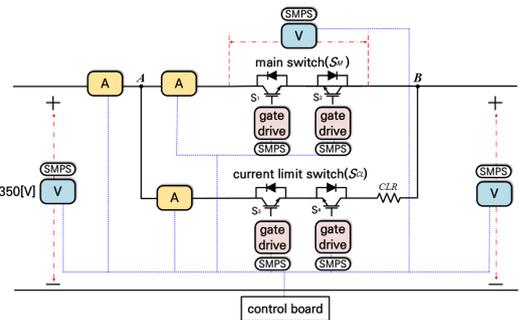


Fig. 11. H/W configuration of protection device

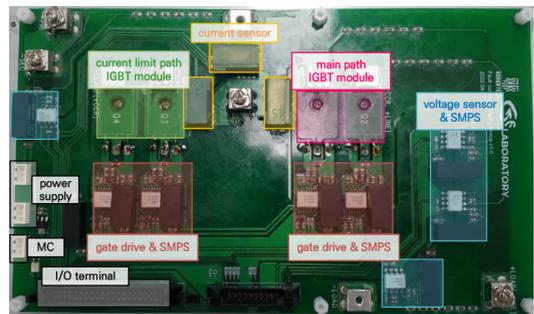


Fig. 12. H/W Implementation of protection device

4.2 S/W 운용부

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, 사고구간 분리용 보호장치의 제어보드는 Fig. 13과 같이, 디지털 신호 프로세서(DSP, digital signal processor)와 PWM(pulse width modulation)포트, A/D포트, 통신 포트로 구성된다. 여기서, DSP는 각 소자들을 독립적으로 제어할 수 있는 TMS320F28335를 채용한다[15]. 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 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, 통신 포트는 전압과 전류 등의 각종 정보를 전달하는 역할을 수행한다.

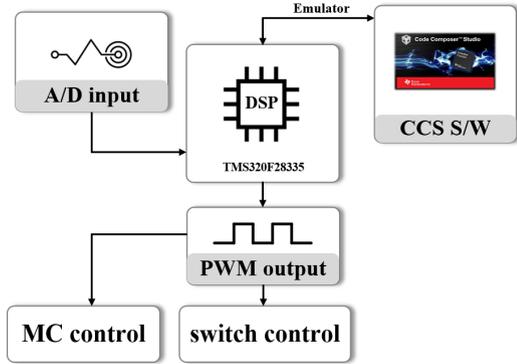


Fig. 13. Configuration of control board in protection device

한편, 2.2절의 사고구간 분리용 보호장치의 동작 메커니즘을 바탕으로, 스위치제어는 Fig. 14와 같이 스위치의 동작상태와 전류값을 고려하여 4가지의 운용모드로 구성된다. 먼저, Mode I의 경우, 계측된 전류(i_{sen})가 메인 컨버터의 정격전류($i_{n,max}$)의 k_1 배 이하이면, 메인 스위치가 turn-on 상태이면 동작신호 값($\delta(t)$)을 "00"으로 설정한다. 또한, Mode II의 경우, 계측된 전류가 정격전류의 k_1 배를 초과하고 k_3 배 미만이며, 메인 스위치가 turn-on 상태이면 동작신호 설정값을 "01"로 변경시키고, k_2 배 지점에서 전류제한 스위치를 turn-on 시킨다. 한편, Mode III의 경우, 계측된 전류가 정격전류의 k_3 배 이상이고 k_4 배 이하이며, 전류제한 스위치가 turn-on 상태이면, 동작신호 값을 "10"으로 설정하고 k_3 배 지점에서 메인 스위치를 turn-off시킨다. 또한, Mode IV의 경우, 계측된 전류가 정격전류의 k_1 배 이상 이면서 k_4 배 미만이고 전류제한 스위치가 turn-on 상태이면 동작신호 설정값을 "11"으로 변경시키고, k_3 배 지점에서 메인 스위치를 turn-on시킨다. 상기의 스위치 제어 절차는 Eq. (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta(t) = \begin{cases} 00(\text{mode I}) \\ \text{if } S_M = ON \\ \text{and } i_{sen} \leq k_1 \times i_{n,max} \\ 01(\text{mode II}) \\ \text{if } S_M = ON \\ \text{and } k_1 \times i_{n,max} < i_{sen} < k_3 \times i_{n,max} \\ 10(\text{mode III}) \\ \text{if } S_{CL} = ON \\ \text{and } k_3 \times i_{n,max} \leq i_{sen} \leq k_4 \times i_{n,max} \\ 11(\text{mode IV}) \\ \text{if } S_{CL} = ON \\ \text{and } k_1 \times i_{n,max} \leq i_{sen} < k_4 \times i_{n,max} \end{cases} \quad (13)$$

where, $\delta(t)$: operation mode of protection device, S_M : main switch, S_{CL} : current limit switch, i_{sen} : measured current, k_1 : coefficient of rated current, k_2 : margin of main converter, k_3 : coefficient of fault current, k_4 : coefficient of fault current limit, $i_{n,max}$: rated current of main converter

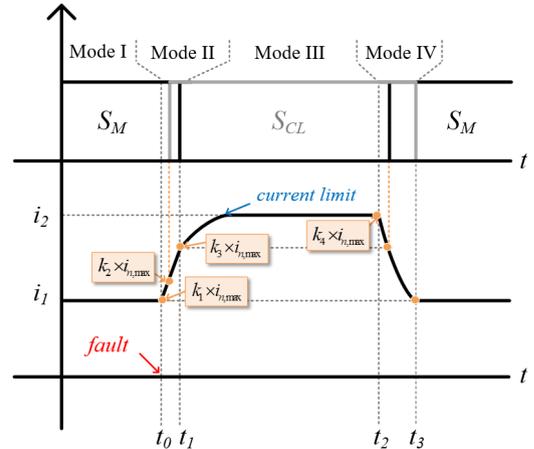


Fig. 14. Concept of switch control in protection device

5. 시험 결과 및 분석

5.1 시험 조건

본 논문에서 구현한 350V DC 선로용 4kW급 사고구간 분리용 보호장치의 동작특성을 분석하기 위한 사고상태의 모의시험 구성도와 시험 조건은 각각 Fig. 15와 Table 1과 같다. 여기서, 사고구간 분리용 보호장치의 사용되는 스위치 모듈은 2개, 컬렉터-에미터 내압과

사용률은 각각 650[kV], 60[%], 전류제한 저항은 5.8 [Ω]으로 상정한다. 한편, 저역통과필터의 저항 및 커패시턴스는 5[kHz]의 차단주파수를 고려하여 10[kΩ]과 2.7[nF], 전압센서의 저항은 430[Ω], $R_1 \sim R_6$ 는 200[kΩ]으로 상정한다. 또한, 모의 부하부는 10[A], 20[A], 30[A]를 구현하기 위하여 각각 35[Ω], 17.5[Ω], 11.7 [Ω]로 설정하며, 여기서 11.7[Ω]은 사고상태인 것으로 상정한다. 한편, 모의선로 임피던스부는 3가지(Case I ~ Case III)의 조건으로 설정한다.

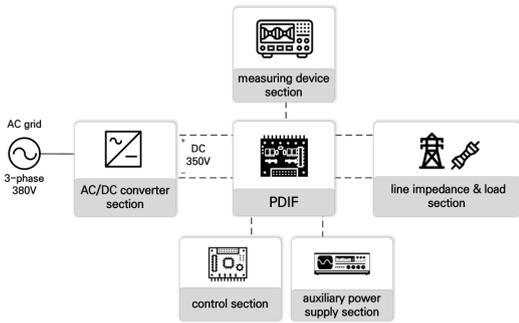


Fig. 15. Configuration of test bed for protection device

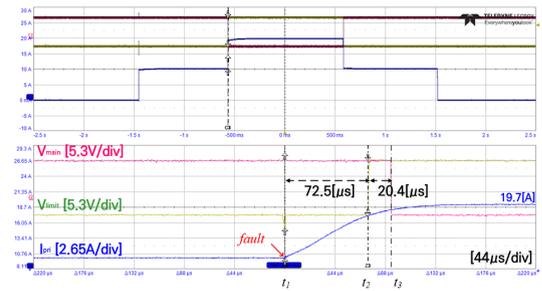
Table 1. Test conditions of protection device

items		contents	
AC grid	rated voltage	380[V]	
	rated capacity	10.5[kW]	
AC/DC converter section	primary side voltage	350[V]	
	IGBT	number of modules	2
collector-emitter voltage		650[kV]	
load factor of insulation voltage		60[%]	
turn-on delay time		21[ns]	
turn-off delay time		180[ns]	
protection device for isolating fault section	current limit path	current limit resistor	5.8[Ω]
	low pass filter	LPF resistor	10[kΩ]
		LPF capacitor	2.7[nF]
auxiliary power supply section	voltage sensor	resistor	200[kΩ], 430[Ω]
		supply voltage	12[V], 24[V]
load section	current	35[Ω], 10[A]	
		17.5[Ω], 20[A]	
		11.7[Ω], 30[A]	
line impedance section	Case I	0.31[Ω]+1.79[mH]	
	Case II	0.62[Ω]+3.57[mH]	
	Case III	0.94[Ω]+5.36[mH]	

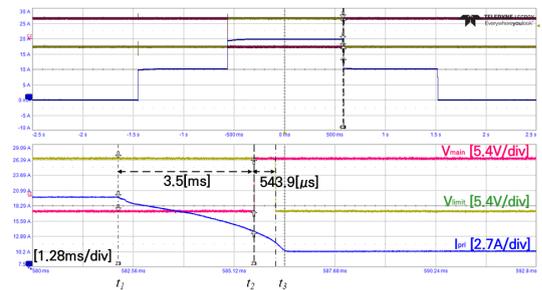
5.2 350V DC 선로용 4kW급 사고구간 분리용 보호장치 동작특성

5.2.1 Case I의 동작특성

상기의 시험 조건에 따라 모의선로 임피던스가 0.31 [Ω]+1.79[mH]인 경우, 사고구간 분리용 보호장치의 동작특성을 나타내면 Fig. 16과 같다. 여기서, Fig. 16(a)는 사고가 발생한 경우를 나타내며, Fig. 16(b)는 사고구간이 분리된 후를 나타낸 것이다. 즉, Fig. 16(a)의 t_1 지점에서 사고가 발생하면, 72.5[μs] 이후 전류제한 스위치(V_{limit})는 turn-on되고, 메인 스위치(V_{main})는 t_2 지점부터 20.4[μs] 이후에 turn-off된다. 이때, 사고구간 분리용 보호장치는 사고전류를 설정 목표치인 19.7[A]로 제한시킬 수 있음을 알 수 있다. 한편, Fig. 16(b)의 t_1 지점에서 사고구간이 분리되면, 3.4[ms] 이후 메인 스위치가 turn-on되고, 전류제한 스위치는 t_2 지점으로부터 543.9[μs] 이후 turn-off함을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 구현한 사고구간 분리용 보호장치를 통해, 30[A]의 사고전류에 대하여 65.7[%]인 19.7[A]로 신속하게 제한시켜, 메인컨버터의 탈락을 방지할 수 있음을 알 수 있다.



(a) during a fault



(b) after isolation of fault section

Fig. 16. Operation characteristics of protection device (Case I)

5.2.2 Case II의 동작특성

상기의 시험 조건에 따라 모의선로 임피던스가 0.62 [Ω]+3.57[mH]인 경우, 사고구간 분리용 보호장치의 동작특성을 나타내면 Fig. 17과 같다. 여기서, Fig. 17(a)는 사고가 발생한 경우를 나타내며, Fig. 17(b)는 사고구간이 분리된 후를 나타낸 것이다. 즉, Fig. 17(a)의 t_1 지점에서 사고가 발생하면, 57[μs] 이후 전류제한 스위치(V_{limit})는 turn-on되고, 메인 스위치(V_{main})는 t_2 지점부터 20.3[μs] 이후에 turn-off된다. 이때, 사고구간 분리용 보호장치는 사고전류를 설정 목표치인 19.4[A]로 제한시킬 수 있음을 알 수 있다. 한편, Fig. 17(b)의 t_1 지점에서 사고구간이 분리되면, 3.5[ms] 이후 메인 스위치가 turn-on되고, 전류제한 스위치는 t_2 지점으로부터 558.7[μs] 이후 turn-off함을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 구현한 사고구간 분리용 보호장치를 통해, 30[A]의 사고전류에 대하여 64.7%인 19.4[A]로 신속하게 제한시켜, 메인컨버터의 탈락을 방지할 수 있음을 알 수 있다.

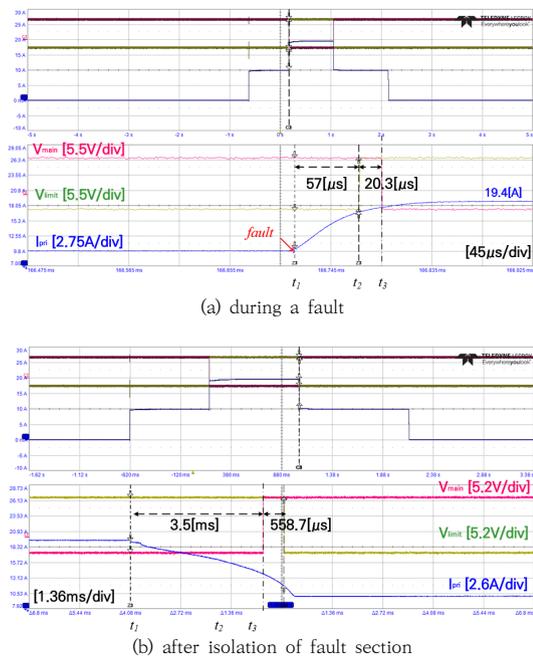


Fig. 17. Operation characteristics of protection device (Case II)

5.2.3 Case III의 동작특성

상기의 시험 조건에 따라 모의선로 임피던스가 0.94

[Ω]+5.36[mH]인 경우, 사고구간 분리용 보호장치의 동작특성을 나타내면 Fig. 18과 같다. 여기서, Fig. 18(a)는 사고가 발생한 경우를 나타내며, Fig. 18(b)는 사고구간이 분리된 후를 나타낸 것이다. 즉, Fig. 18(a)의 t_1 지점에서 사고가 발생하면, 55.2[μs] 이후 전류제한 스위치(V_{limit})는 turn-on되고, 메인 스위치(V_{main})는 t_2 지점부터 20.3[μs] 이후에 turn-off된다. 이때, 사고구간 분리용 보호장치는 사고전류를 설정 목표치인 19.1[A]로 제한시킬 수 있음을 알 수 있다. 한편, Fig. 18(b)의 t_1 지점에서 사고구간이 분리되면, 3.5[ms] 이후 메인 스위치가 turn-on되고, 전류제한 스위치는 t_2 지점으로부터 662[μs] 이후 turn-off함을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 구현한 사고구간 분리용 보호장치를 통해, 30[A]의 사고전류에 대하여 63.7%인 19.1[A]로 신속하게 제한시켜, 메인컨버터의 탈락을 방지할 수 있음을 알 수 있다.

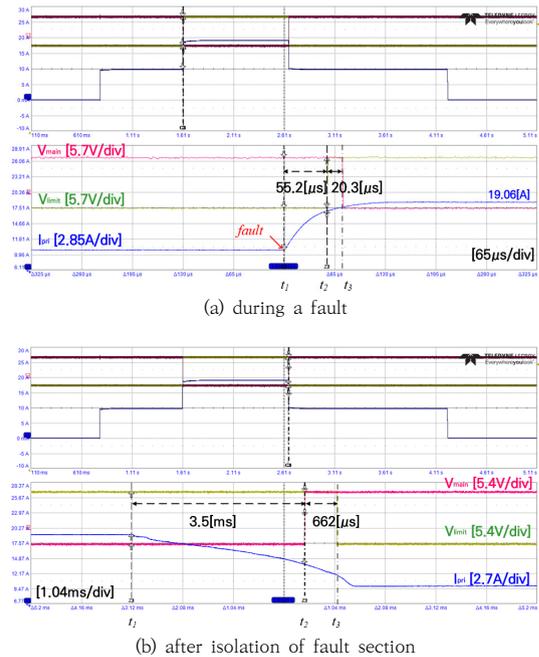


Fig. 18. Operation characteristics of protection device (Case III)

5.2.4 종합분석

상기의 시험 결과를 바탕으로 사고구간 분리용 보호장치의 동작특성을 종합적으로 나타내면 Table 2와 같다. 여기서, 사고가 발생한 경우, 사고구간 분리용 보호장치가 동작 메커니즘을 바탕으로 55.2~72.5[μs] 이내

로 사고전류를 신속하게 제한시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한, 사고구간 분리 후 동작특성은 선로임피던스에 따라 3.94~4.16[ms]로 변동됨을 알 수 있다.

Table 2. Operation characteristics of protection device

items	Case I	Case II	Case III
line impedance	0.31[Ω]+ 1.79[mH]	0.62[Ω]+ 3.57[mH]	0.94[Ω]+ 5.36[mH]
limit current	19.7[A]	19.4[A]	19.1[A]
auxiliary mode time	92.9[μs]	77.3[μs]	75.5[μs]
restoration mode time	3.94[ms]	4.06[ms]	4.16[ms]
main switch turn-on time after fault section isolation	3.4[ms]	3.5[ms]	3.5[ms]

6. 결론

본 논문에서는 소규모 DC 배전계통에서 사고가 발생하는 경우 정전구간을 최소화하기 위하여, 사고전류를 제한할 수 있는 LVDC 선로용 4kW급 사고구간 분리용 보호장치를 구현한다. 이에 대한 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 논문에서 구현한 사고구간 분리용 보호장치의 동작특성을 분석한 결과, 사고구간 분리용 보호장치가 30[A]의 사고전류에 대하여 설정 목표치인 19.1~19.7[A]로 신속하게 제한시켜, 메인컨버터의 탈락을 방지할 수 있음을 알 수 있다.
- (2) 사고구간 분리용 보호장치의 동작특성을 분석한 결과, 사고구간 분리용 보호장치가 동작 메커니즘을 바탕으로 55.2~72.5[μs] 이내에 사고상태를 판단하여 사고전류를 20.4[μs] 이내로 신속하게 제한시키며, 사고구간 분리 후 동작특성은 선로임피던스에 따라 3.94~4.16[ms]로 변동됨을 알 수 있다.
- (3) 사고구간 분리용 보호장치의 동작특성을 분석한 결과, LVDC 배전계통에서 메인컨버터는 과부하 내량을 초과하는 사고전류에 의하여 급격하게 탈락하여 수용가에 정전을 유발할 가능성이 있지만, 사고구간 분리용 보호장치를 통해 사고전류를 제한시키면 메인컨버터의 보호기능이 동작하기 전에 사고구간을 분리할 수 있음을 알 수 있다.

- (4) 향후에는 제시한 사고구간 분리용 보호장치를 바탕으로, LVDC 배전계통에서 사고가 발생할 경우 건전한 구간에 전력을 안정적으로 공급할 수 있는 보호협조 방안에 대하여 연구를 수행할 예정이다.

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] N. K. Sharma, A. Saxena and S. R. Samantaray, "An Intelligent Differential Protection Scheme for DC Microgrid," *2021 9th IEEE International Conference on Power Systems (ICPS)*, Kharagpur, India, pp.1-6, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPS52420.2021.9670330>
- [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] J. H. Lee, H. D. Jung, J. M. Lee, J. Y. Kim, J. T. Cho, "DC distribution development status and plan of KEPCO for introduction of high-efficiency distribution networks in the future", *The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp.313-314, 2016.
- [5] S. I. Lee, D. W. Kim, J. H. Kim, Y. B. Lim, D. C. Kang, "Design of Low-voltage DC Breaker for DC Circuit Protection", *The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp.192-193, 2013.
- [6] Y. B. Cho, H. J. Yoo, H. M. Kim, Y. J. Won, "Operating Characteristic Analysis of Hybrid DC Circuit Breaker in VSC-HVDC System", *The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp.351-352, 2013.
- [7] S. Z. Jamali, S. B. A. Bukhari, M. O. Khan, M. Mehdi, C. H. Noh, G. H. Gwon, and C. H. Kim, "Protection Scheme of a Last Mile Active LVDC Distribution Network with Reclosing Option," *Energies*, vol. 11, No. 5, 1093, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11051093>
- [8] 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>
- [9] D. S. Lee, J. H. Lee, S. Y. Lee, S. N. Kim, "A Study on

protection method of LVDC distribution system considering AC/DC converter's fault current supply characteristics", *The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp.2343-2344, July 2020.

[10] B. G. Han, H. D. Lee, D. H. Tae, D. S. 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, pp1146-1155, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2021.70.8.1146>

[11] G. Li, L. Zhang, T. Joseph, J. Liang, and G. Yan, "Comparisons of MVAC and LVDC Systems in Dynamic Operation, Fault Protection and Post-Fault Restoration," *IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Lisbon, Portugal, pp.5657-5662, December 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8927251>

[12] S. H. Kwon, H. D. Lee, Y. H. Nam, and D. S. Rho, "Optimal Operation Algorithm of Protection Devices in Distribution Systems With PV System," *Korea Academy Industrial Cooperation Society*, Vol.19, No.5, pp.17-26, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.5.17>

[13] M. K. Kang, H. D. Lee, D. H. Tae, D. S. Rho, "A Study on Protection Coordination Algorithm for Separating Fault Section in LVDC Distribution System." *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.22, No.1, pp.768-776, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.1.768>

[14] B. G. Han, H. D. Lee, J. M. Kim, S. M. Choi, D. S. Rho, "Modeling and Fault Current Characteristics of ± 35 kV MVDC Distribution System Based on PSCAD/EMTDC" *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.23, No.4, pp1-9, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.4.1>

[15] T. W. Jeon, J. R. Ahn, Application and characteristics of the TMS320F280x DSP, *KIPE MAGAZINE*, Vol.13, No.1, pp15-19, 2008.

이 나 경(Na-Kyung Lee)

[준회원]



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

<관심분야>

LVDC 배전계통, 분산전원연계, 전력품질해석

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

김 지 명(Ji-Myung Kim)

[정회원]



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

<관심분야>

전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

김 경 화(Kyung-Hwa Kim)

[준회원]



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

<관심분야>

전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

노 대 석(Dae-Seok Rho)

[종신회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학
학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학
과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교
대학원 전기공학과 (공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국
전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신
공학부 교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석