

# 사고전류 경사각 특성을 고려한 실시간 지능형 정전확대 방지장치의 운용 알고리즘에 관한 연구

김혜원\*, 장형안\*, 이민행\*, 김경화\*, 노대석\*

\*한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail:khw8805@koreatech.ac.kr

## An Operation Algorithm of Real Time Intelligent Blackout Protection Device Considering Slope Characteristics of Fault Current

Hye-Won Kim\*, Hyeong-An Jang\*, Min-Haeng Lee\*,

Kyung-Hwa Kim\*, Dae-Seok Rho\*

\*Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

### 요약

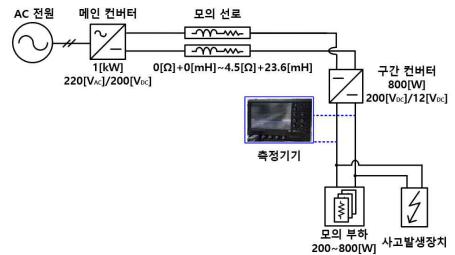
DC 배전망은 신재생에너지 전원의 보급 확대와 전력 손실 저감 등의 이점을 가지고 있으나, 사고 발생 시 메인 컨버터의 탈락으로 인해 정전 구간이 확대될 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 선로 임피던스에 의한 전압강하율과 부하율에 따른 사고전류의 경사각 특성을 분석하고, 이를 바탕으로 사고 여부를 신속하게 판별하는 실시간 지능형 정전확대 방지장치(intelligent blackout protection device, IBPD)의 운용 알고리즘을 제안한다. 여기서, 운용 알고리즘은 MATLAB S/W 기반의 수치해석을 통해 기준 경사각 산정식과 사고전류 경사각의 예측 모델을 도출하고, 이를 바탕으로 IBPD의 정정치를 산정하여 실시간으로 사고 여부를 판정한다. 상기에서 제시한 운용 알고리즘을 바탕으로 다양한 시나리오에 기반한 IBPD의 운용특성을 분석한 결과, IBPD는 기준 경사각을 실시간으로 재산정하여 사고 여부를 정확하게 판단하고, 수 [ $\mu s$ ] 이내에 사고전류를 제한할 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서 제안한 IBPD는 메인 컨버터의 탈락을 방지하여, 정전 구간을 최소화할 수 있음을 확인할 수 있다.

### 1. 서 론

최근, 전 세계적인 탄소중립 정책과 신재생에너지의 보급 확대, DC 부하의 증가 등으로 인해 DC 배전망에 대한 연구가 확대되고 있다[1]. DC 배전망은 기존의 AC 배전망 대비 에너지 손실 감소와 분산 전원의 수용성 향상 등의 장점을 가지지만, 안정적인 운용과 보호협조에 관한 연구는 여전히 미흡한 실정이다[2,3]. 또한, 기존 연구에서 사고전류의 크기를 바탕으로 사고를 판단하는 방식 등이 제안되고 있지만, LVDC 배전망의 보호협조 시간을 확보하는데 한계점이 있어, 신속하게 사고 여부를 판별하는 방안이 요구된다[2]. 따라서, 본 논문에서는 LVDC 배전망의 선로 임피던스에 따른 전압강하율과 부하율에 따른 사고전류의 경사각 특성을 바탕으로 사고 여부를 신속하고 정확하게 판단함으로써, 수용가의 정전 구간을 최소화할 수 있는 실시간 지능형 정전확대 방지장치(intelligent blackout protection device, IBPD)의 운용 알고리즘을 제안한다.

### 2. LVDC 배전망의 사고전류 경사각 특성

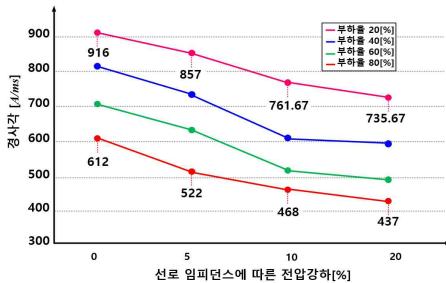
LVDC 배전망에서 단락사고가 발생하는 경우, 사고지점까지의 선로 임피던스와 부하율은 사고전류의 크기와 경사각에 영향을 미칠 수 있다. 이를 분석하기 위하여, 메인 컨버터, 구간 컨버터, 모의 선로, 사고발생장치, 모의 부하 등으로 구성된 시험장치를 나타내면 그림 1과 같다.



[그림 1] 사고전류 특성 시험장치의 구성도

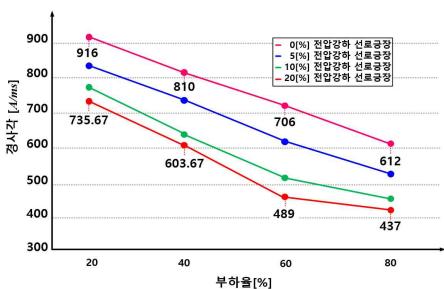
상기에서 제시한 시험장치를 바탕으로, 선로 임피던스에 따른 사고전류의 경사각 특성을 종합적으로 나타내면 그림 2와 같다. 먼저, 20[%]의 부하율 조건에서 사고가 발생한 경우, 사고전류는 0[%]의 전압강하에서 916.0[A/ms]의 변화분을 나타내고, 20[%]

의 전압강하에서 735.7[A/ms]로 산정됨을 알 수 있다. 즉, LVDC 배전망에서 사고전류의 경사각은 사고지점까지의 선로 임피던스 증가에 따라 감소됨을 알 수 있다.



[그림 2] 선로 임피던스에 따른 사고전류의 경사각 특성

또한, 부하율에 따른 사고전류의 경사각 특성을 종합적으로 나타내면 그림 3과 같다. 먼저, 0[%]의 전압강하 조건에서 사고가 발생한 경우, 사고전류는 20[%]의 부하율에서 916[A/ms]의 변화분을 나타내고, 80[%]의 부하율에서 612[A/ms]로 산정됨을 알 수 있다. 즉, LVDC 배전망에서 사고전류의 경사각은 부하 용량의 증가에 따라 감소됨을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 선로 임피던스와 부하율에 따른 사고전류의 경사각 특성을 바탕으로, 사고 여부를 신속하고 정확하게 판별하여 정전구간을 최소화하는 실시간 지능형 정전확대 방지장치(IPPD)의 운용 알고리즘을 제안한다.



[그림 3] 부하율에 따른 사고전류의 경사각 특성

### 3. 사고전류 경사각 특성을 고려한 실시간 IPPD의 운용 알고리즘

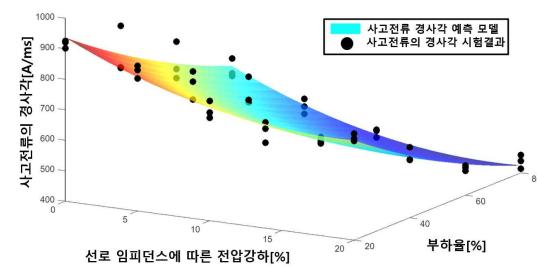
#### 3.1 회귀분석을 통한 기준 경사각 산정방안

상기의 2장에서 제시한 선로 임피던스와 부하 용량에 따른 사고전류의 경사각 특성을 바탕으로, 본 논문에서는 수치해석과 예측 모델을 통해 IPPD의 기준 경사각을 산정한다. 여기서, 수치해석은 종속변수인 사고전류의 경사각 데이터와 두 개의 독립변수(전압강하율, 부하율)를 고려하여 다항 회귀분석법(polynomial regression method)을 적용한다. 이를 바탕으로, IPPD의 기준 경사각을 산정하기 위한 정식화를 수행하면 식 (1)과 같다. 즉,

기준 경사각은 회귀분석으로 산정된 사고전류 경사각에 여유율( $1-K$ )을 곱하여 적용한다. 한편, IPPD의 사고 판별을 위한 정정치를 산정하기 위하여, 사고전류 경사각의 예측 모델을 수행하면 그림 4와 같다.

$$I_{slope.ref}(x, y(t)) = (1 - K) \times \left[ a_0 + a_1 xy(t) + a_2 x^2 + a_3 y(t)^2 + a_4 x y(t) + a_5 y(t)^2 \right] \quad (1)$$

여기서,  $I_{slope.ref}(x, y(t))$ : 기준 경사각[A/ms],  $x$ : 선로 임피던스에 따른 전압강하[%],  $y(t)$ : 부하율[%],  $a_0$ : 상수항(1087.3864),  $a_1$ :  $x$ 와  $y$ 의 상관계수(0.0097),  $a_2$ ,  $a_3$ :  $x$ 의 1차 및 2차 계수(-22.8315, 0.6077),  $a_4$ ,  $a_5$ :  $y(t)$ 의 1차 및 2차 계수(-8.1120, 0.0288),  $K$ : 여유율[%]



[그림 4] 사고전류 경사각 예측 모델

#### 3.2 실시간 IPPD의 사고 판별 알고리즘

본 논문에서는 상기의 3.1절에서 제시한 IPPD의 기준 경사각을 바탕으로 실시간으로 사고를 판별할 수 있는 IPPD 운용 알고리즘을 제안한다. 이에 대한 상세한 절차를 나타내면 다음과 같다.

[Step 1] 메인 컨버터와 구간 컨버터의 정격용량, 출력전압, 선로 임피던스, 측정주기( $\Delta t$ )등의 데이터를 입력한다.

[Step 2] 전압 및 전류센서를 통하여, 구간 컨버터 2차 측의 전압( $V_{sec}(t)$ )과 전류( $I_{sec}(t)$ )를 측정하고, LPF를 통해 노이즈를 제거한다.

[Step 3] 측정시간( $t$ )이 1보다 작거나 같은 경우, [step 4]로 이동하고, 측정시간( $t$ )이 1보다 큰 경우에, [step 5]로 진행한다.

[Step 4] [Step 1]에서 입력된 데이터와 [Step 2]에서 측정된 값( $\dot{V}_{sec}(t)$ ,  $\dot{I}_{sec}(t)$ )을 바탕으로, 부하율( $y(t)$ )을 산정하고, 3.1절에서 제시한 식 (1)을 이용하여 IPPD의 동작 정정치인 사고전류의 기준 경사각

$(I_{slope,ref}(x, y(t - \Delta t)))$ 을 산정한다.

[Step 5] [Step 2]에서 측정된 값( $\dot{V}_{sec}(t)$ ,  $\dot{I}_{sec}(t)$ )을 바탕으로 하기의 식 (2)와 같이, 사고전류 경사각( $I_{slope,fault}(t)$ )을 산정한다.

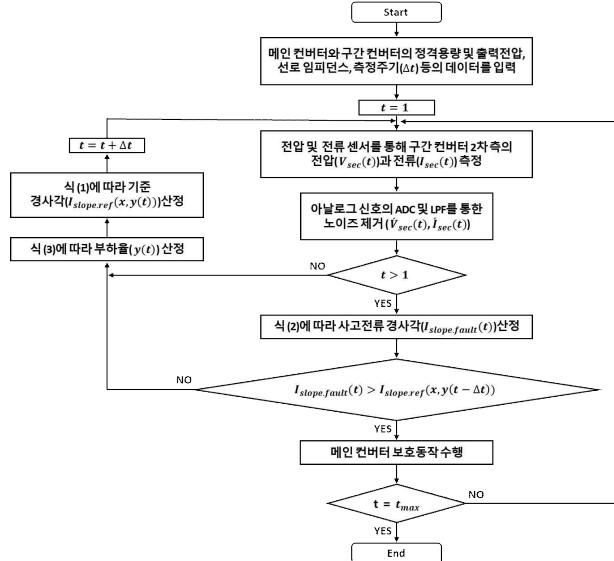
$$I_{slope,fault}(t) = \frac{\dot{I}_{sec}(t) - \dot{I}_{sec}(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (2)$$

여기서,  $I_{slope,fault}(t)$ : 사고전류 경사각[A/ms],  $\dot{V}_{sec}(t)$ ,  $\dot{I}_{sec}(t)$ : 필터링된 구간 컨버터의 2차 측 전압[V] 및 전류[A]

[Step 6] [Step 5]에서 산정된 사고전류 경사각이 기준 경사각( $I_{slope,ref}(x, y(t - \Delta t))$ )보다 큰 경우, [Step 7]로 진행하고, 작은 경우, [step 4]로 이동한다.

[Step 7] 사고로 판단하여 보호동작을 수행하고, 측정시간( $t$ )이  $t_{max}$ 이면 알고리즘을 종료하고, 아니면 [Step 2]으로 이동한다.

따라서, 상기의 알고리즘을 플로우 차트로 나타내면 그림 5와 같다.

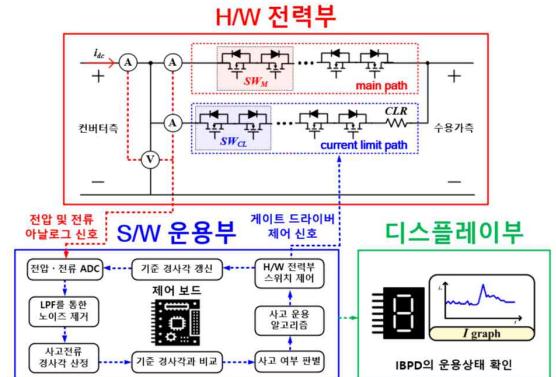


[그림 5] IBPD의 사고 판별 알고리즘

#### 4. LVDC 배전망용 실시간 IBPD의 구현

상기의 기준 경사각 산정식과 운용 알고리즘을 바탕으로, IBPD를 구현하면 그림 6과 같다. 장치는 H/W 전력부, S/W 운용부, 디스플레이부로 구성된다. 여기서, H/W 전력부는 메인 스위치와 전류 제한 스위치 및 전류 제한 저항으로 구성된다. 또한,

S/W 운용부는 전압·전류 센서를 통해 사고전류 경사각과 기준 경사각을 산정하고 사고를 판단하여 H/W 전력부를 제어한다. 한편, 디스플레이부는 계측된 전압·전류 데이터를 바탕으로 전류 그래프를 실시간 표시하여 IBPD의 운용상태를 시각화한다.



[그림 6] IBPD의 구성도

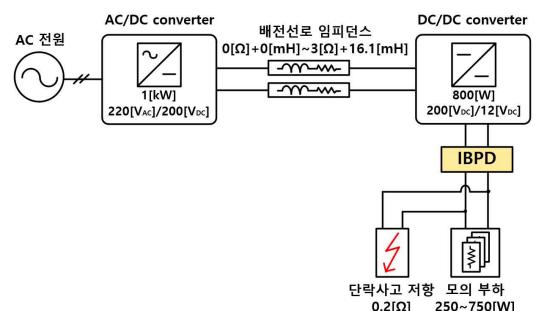
#### 5. 시험 결과 및 분석

##### 5.1 시험 조건

본 논문에서 제시한 IBPD의 운용특성을 분석하기 위한 시험조건은 표 1과 같다. 상기의 시험조건을 바탕으로, IBPD의 운용특성을 분석하기 위한 LVDC 배전망은 그림 7과 같다. 한편, IBPD의 동작 특성을 분석하기 위한 상정 시나리오는 표 2와 같이, 선로 임피던스와 부하 용량에 따라 분류된다.

[표 1] 시험 조건

items	contents
메인 컨버터	용량 [kW] 1
	입력 전압 [ $V_{AC}$ ] 220
	출력 전압 [ $V_{DC}$ ] 200
구간 컨버터	용량 [W] 800
	입력 전압 [ $V_{DC}$ ] 200
	출력 전압 [ $V_{DC}$ ] 12
선로 임피던스	2.5 [%] 전압강하 1[Ω]+5.4[mH]
	7.5 [%] 전압강하 3[Ω]+16.1[mH]
부하 용량	경부하 [W] 250
	중부하 [W] 500
	피크 부하 [W] 750



[그림 7] IBPD가 설치된 LVDC 배전망의 구성도

[그림 9] IBPD에 의해 제한된 전류

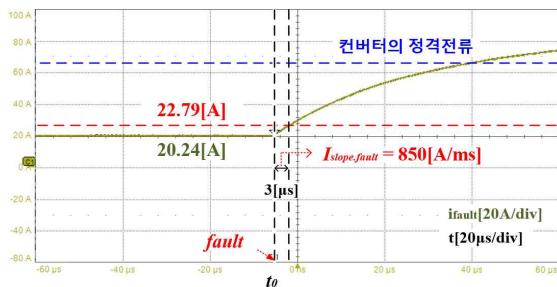
[표 2] IBPD의 운용특성을 분석하기 위한 상정 시나리오

scenarios	secondary line impedance	load capacity
Case I	1[Ω]+5.4[mH]	250[W]
Case II		500[W]
Case III		750[W]
Case IV	3[Ω]+16.1[mH]	250[W]
Case V		500[W]
Case VI		750[W]

## 5.2 실시간 IBPD의 운용특성

### 5.2.1 실시간 기준 경사각 운용특성

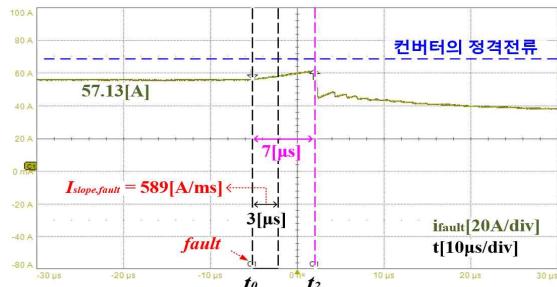
상기의 표 2에서 제시한 상정 시나리오를 바탕으로, 사고전류의 경사각이 가장 크게 산정되는 Case I의 경사각 특성은 그림 8과 같다. 여기서, 사고전류는 사고 발생 후 약  $3[\mu\text{s}]$  이내에 20.2[A]에서 22.79[A]로 급격하게 증가하여, 850[A/ms]의 경사각을 가진다. 또한, 상기의 식(1)을 통해 사고전류의 경사각은 849.9[A/ms]로 산정되고, 3[%]의 여유율을 고려한 기준 경사각은 824.4[A/ms]로 적용된다.



[그림 8] Case I의 사고전류 경사각 특성

### 5.2.2 사고전류 제한 특성 분석

상기의 상정 시나리오 중 피크 부하 시의 사고를 모의한 Case III의 IBPD 운용특성은 그림 9와 같다. 여기서, 그림 9는 IBPD에 의해 제한된 사고전류 특성을 나타낸다. 먼저, 사고가 발생하면, 수 [ $\mu\text{s}$ ] 이내에 IBPD가 current limit path를 작동시키고, main path를 차단한다. 이에 따라, 그림 9와 같이, IBPD에 의해 사고전류의 크기가 컨버터의 정격 이하로 유지됨을 확인할 수 있다.



## 6. 결 론

본 논문에서는 선로 임피던스와 부하율에 따른 사고전류 경사각 특성을 바탕으로, 사고 여부를 실시간으로 판단하는 IBPD 운용 알고리즘을 제안한다. 상기 알고리즘을 적용한 결과, IBPD는 기준 경사각을 실시간으로 재산정하여 사고 여부를 정확하게 판단하고, 수 [ $\mu\text{s}$ ] 이내에 사고전류를 제한할 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서 제안한 IBPD는 메인 컨버터의 탈락을 방지하고 정전 구간을 최소화할 수 있음을 확인할 수 있다.

### 감사의 글

이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 지원으로 한국 산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-00409639, 2025년 산업혁신인재성장지원사업)

### 참고문헌

- [1] 이나경 외 4명, “LVDC 선로용 4kW급 사고구간 분리용 보호 장치의 설계 및 구현”, 한국산학기술학회 논문지, 24권, 제 4호, pp. 19–30, 2023.04.
- [2] 한병길 외 5명, “DC 배전계통에서 사고전류 경사각을 이용한 지능형 사고구간 분리용 보호장치의 제어 알고리즘에 관한 연구”, 한국산학기술학회 논문지, 25권, 제 11호, pp. 18–31, 2024.11.
- [3] 장형안 외 5명, “LVDC 배전망의 1kW급 지능형 정전화대 방지장치의 구현 및 운용특성에 관한 연구”, 한국산학기술학회 논문지, 26권, 제 6호, pp. 87–97, 2025.06.