

# 시간 및 주파수 영역 정보를 이용한 직렬 DC 아크 고장 검출 알고리즘

채수용, 박진주, 박석인, 한수빈  
한국에너지기술연구원

## Series DC arc fault detection algorithm using time and frequency domain information

Suyong Chae, Jinju Park, Sukin Park, Soobin Han  
Korea Institute of Energy Research

### ABSTRACT

본 논문은 DC 배전시스템 내에서 발생할 수 있는 직렬 DC 아크 고장을 검출하기 위한 알고리즘을 제안한다. 직렬 DC 아크 고장은 동일 전위의 도선 또는 접속점의 노화 등으로 인해 발생하며, 아크 고장 에너지의 크기에 따라 수초 이내에 화재 사고를 유발할 수 있기 때문에 정확한 고장 검출을 통한 빠른 제거가 필요하다. 스위칭 전력변환 장치에서 발생하는 노이즈 성분에 의한 검출 알고리즘의 오동작 현상을 제거하기 위해 시간 영역에서의 전류 변화와 주파수 영역에서의 전류 크기 차이를 동시에 이용하여 직렬 DC 아크 고장 발생여부를 검출하게 된다. 제안 알고리즘은 5kW급 용량의 380V 저전압 DC 배전 시스템을 대상으로 검증하였다.

### 1. 서론

AC 배전 시스템 대비 전력공급 효율성 향상을 위해 저전압 DC 배전 시스템의 적용을 위한 연구가 다양한 분야에서 시도되고 있다. DC 배전 시스템은 태양광, 연료전지 및 배터리와 같은 DC 기반 분산 에너지원을 DC AC 인버터를 사용하여 AC로 변환 후 연계하지 않고 DC에 직접 연계시킬 수 있는 구조이다. DC 직접 연계를 통한 전력변환 단계의 축소는 기존 AC 배전 시스템 대비 전력 에너지 변환 손실의 저감을 가능하게 하는 특징이 있다. 이러한 연계 용이성 및 고효율 특성으로 인해 인터넷 데이터 센터, 전기 선박, 비행기, 전기 자동차 및 건물 등 DC 기반 전력공급 체계를 적용할 수 있는 다양한 분야로 응용사례가 빠르게 증가하고 있다.

DC 배전 시스템의 안정성 확보를 통해 다양한 분야에 적용하기 위해서는 아크 고장현상 등을 정확하게 검출할 수 있는 보호기술의 개발이 매우 필요하다. 기존 AC 배전 시스템은 전위가 중성점을 기준으로 교번하는 시스템으로 DC 배전 시스템 대비 아크 고장 현상이 발생할 가능성이 낮다. 하지만, DC 배전 시스템은 고정 전위를 항상 유지하고 있는 특성으로 인해 동일 전위 도선이나 접속점 등에서 노화나 사고로 간극이 형성될 경우 직렬 아크 고장 현상이 발생할 수 있으며, 서로 다른 전위가 사고 등에 의해 단락될 경우 병렬 아크 고장 현상이 발생할 수 있다. 특히, 직렬 아크 고장에 의한 전류 변화 현상은 부하 전력의 변동에 의한 전류 변화 현상과 유사하기 때문에 정확한 검출이 비교적 어려운 특성을 보인다.

직렬 DC 아크 고장의 검출을 위해 전류 성분의 주파수 영

역 분석을 통한 연구가 태양광 발전 시스템을 중심으로 다양하게 시도되고 있다<sup>[1]</sup>. 하지만, 연계된 분산전원 전력변환 장치 등에서 발생하는 스위칭 노이즈 주파수 성분과의 명확한 분리가 어렵기 때문에 아크 고장 발생 여부를 정확하게 검출하기 어려운 문제가 있다. 특히, 다양한 분산 전원과 부하가 연계된 DC 배전 시스템의 경우 복수의 전력변환 장치로부터 발생하는 스위칭 노이즈 주파수 성분이 결합되어 나타나기 때문에 아크 고장 발생 여부를 정확한 검출은 더욱 어렵게 된다. 본 논문에서는 검출 성능 향상을 위해 시간 영역의 전류 변화 성분과 주파수 영역의 전류 크기 차이를 동시에 이용하는 직렬 DC 아크 고장 검출 알고리즘을 제안하고자 한다.

### 2. 직렬 DC 아크고장

#### 2.1 직렬 DC 아크고장 현상

그림 1은 본 논문에 적용된 5kW급 용량의 380V 저전압 DC 배전 시스템의 구성도를 나타낸다. DC 배전 시스템은 3상 380V AC 계통과 연계된 양방향 AC/DC 컨버터, 220V 150W AC Lamp 구동을 위한 DC/AC 인버터, 300V 1kW DC 부하 공급을 위한 DC/DC 컨버터, 48V 1kW DC 부하 공급을 위한 DC/DC 컨버터, 48V 100W LED 구동을 위한 DC/DC 컨버터와 2kW 저항성 부하로 구성되어 있다. 직렬 DC 아크 고장은 도선 또는 접속점의 다양한 부분에서 발생이 가능하지만, 본 논문에서는 제안 알고리즘의 실험적 검증을 위해 그림 1의 양극 도선 A부분에 그림과 같은 장치를 이용하여 간극을 형성시켜 직렬 DC 아크 고장현상이 발생하도록 하였다. 직렬 DC 아크 고장 현상이 발생하게 되면 아크 방전에 의해 선로 임피던스가

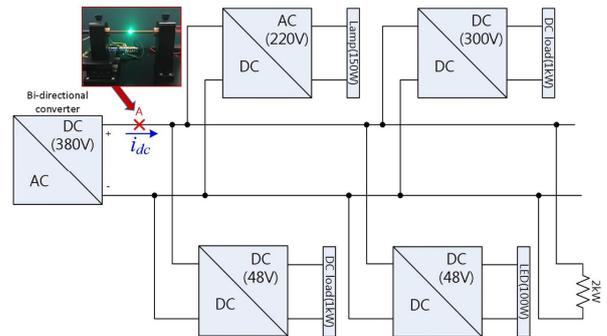


그림 1 380V 저전압 DC 배전시스템 구성도  
Fig. 1 380V low voltage DC distribution system diagram

증가하면서 전류( $i_{dc}$ )가 순간적으로 급격히 감소하게 되며, 불안정 방전 현상으로 인해 전류의 노이즈 주파수 성분이 급격히 증가하게 된다.

## 2.2 직렬 DC 아크고장 검출 알고리즘

제안하는 직렬 DC 아크고장 검출 알고리즘은 전류  $i_{dc}(t)$ 의 시간 영역 정보와 주파수 영역 정보를 동시에 이용한다. 전류  $i_{dc}(t)$ 를  $T_s$  간격으로 샘플링 한 신호인  $i_{dc}(n)$ 의 노이즈 저감을 위해 수식(1)의 Gaussian filter를 적용하면 수식(2)의  $i_{dc-g}(n)$ 과 같이 표현된다.

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-x^2/(2\sigma^2)} \quad (1)$$

$$i_{dc-g}(n) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} g(m) i_{dc}(n-m) \quad (2)$$

전류의 시간영역 변동성분  $i_{dc-e}(n)$ 은 수식(3)과 같은 Difference operator를 적용하여 계산된다.

$$i_{dc-e}(n) = i_{dc-g}(n-1) - i_{dc-g}(n+1) \quad (3)$$

$i_{dc-e}(n)$ 은 일반적으로 정규분포의 특성을 보이게 되며,  $i_{dc-e}(n)$ 의 크기가 현 시점 이전 N개 샘플에 대한 표준편차 보다 양의 방향으로 기준값 보다 클 경우 분포 구간을 벗어나게 된다. 이 시점은 전류가 급격히 감소하게 되는 지점으로 직렬 아크 고장 발생 가능성이 높은 시점으로 인식하게 된다.

시간영역에서의 전류 변동성분이  $n=0$  시점에서 급격히 감소하는 것으로 인식되면 주파수 영역 비교를 수행한다.  $n=0$  시점 이전의  $p*N$ 개 샘플에 대해 N개씩 p회 Discrete fourier transform(DFT)를 수행한 결과를 주파수별로 평균한  $I_{dc-avg}(u)$ 는 수식(4)로 표현되며,  $n=0$  시점 이후의 DFT 신호는 수식(5)로 표현된다.

$$I_{dc-avg}(u) = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p \left( \sum_{n=kN-1}^{(k-1)N} i_{dc-g}(n) e^{-j2\pi un/N} \right) \quad (4)$$

$$I_{dc-p}(u) = \sum_{n=0}^{N-1} i_{dc-g}(n) e^{-j2\pi un/N} \quad (5)$$

$|I_{dc-p}(u)|$ 를 N개 샘플씩 q회 반복하여 정상상태 주파수 영역 평균값 크기  $|I_{dc-avg}(u)|$ 와 주파수 별로 비교한 후 정해진 기준값 보다 클 경우 직렬 DC 아크 고장으로 판단하게 된다.

## 3. 실험결과

양의 도체에 간극이 5mm 형성되어 300W 크기의 직렬 DC 아크 고장이 발생할 경우의 실험 결과는 그림 2와 같다. 샘플링 주기는 1MHz 이며, 1024개씩 수집된 데이터에 대해서 주파수 분석을 실시하게 된다. 그림 2(a)의 B 지점은 그림 2(c)의 전류 변동성분이 기준값을 넘기 시작하는 지점으로 전류가 급격히 감소하면서 아크고장 발생시작 가능성이 높은 지점이다. B 지점 전의 주파수 평균 성분과 기준값은 그림 2(b)와 같다. 그림 2(d)에 10회 연속적인 주파수 성분이 그림 2(b)의 기준값 보다 크기 때문에 직렬 DC 아크 고장으로 인식하게 된다.

48V DC 부하가 50% 감소할 경우의 시험 결과는 그림 3과 같다. 그림 3(c)의 전류 변동성분 검출을 통해 전류가 급격히 감소하는 그림 3(a)의 B 지점이 검출된다. 그림 3(b)의 B 지점 이전 평균 주파수 성분과 그림 3(d)의 B 지점 이후의 10회 연속 주파수 성분을 비교해 보면, 초기 1회를 제외하고는 기준값 보다 작기 때문에 단순 부하 감소로 판단하게 된다.

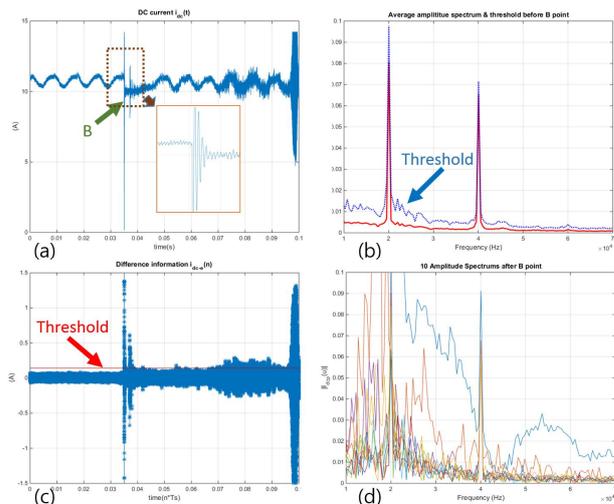


그림 2 직렬 DC 아크고장 시험(간극:5mm, arc power:300W)  
Fig. 2 Series DC arc fault test(gap:5mm, arc power:300W)

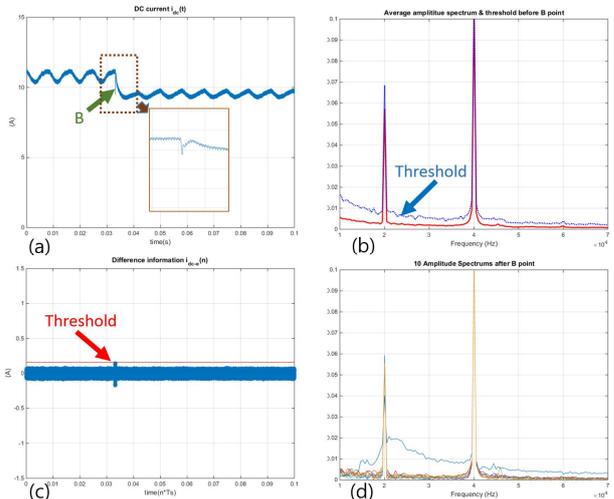


그림 3 부하 변동시험(48V DC/DC converter:1kW→500W)  
Fig. 3 Load step down test(48V DC/DC converter:1kW→500W)

## 4. 결론

본 논문은 DC 배전 시스템의 안정성 향상을 위해 시간영역 정보와 주파수 영역 정보를 동시에 이용하는 직렬 DC 아크 고장 현상 검출 알고리즘을 제안하였다. 전류 감소시점의 검출과 시점 전후의 주파수 성분 크기의 비교를 통해 10kHz 70kHz 영역에서 존재하는 스위칭 노이즈 주파수 성분과 관계없이 직렬 DC 아크 고장의 검출이 가능함을 보였다.

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업으로 수행한 결과입니다(B5 2520)

## 참고 문헌

- [1] X. Yao, L. Herrera, S. Ji, J. Wang, "Characteristic Study and Time Domain Discrete Wavelet Transform Based Hybrid Detection of Series DC Arc Faults," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 29, No. 6, pp. 3103-3115, June 2014.