

UVC 광 신호의 시간 적분량을 이용한 직렬 아크 이벤트의 정량 지표

조윤진*, 조동일*, 남준혁*, 이나라*, 차취건*, 강민찬**, 문원식*
송실대*, LS ELECTRIC**

A Quantitative Indicator for Series Arc Events Using the Time Integral of UVC Optical Signals

Yun-Jin Cho*, Dong-Il Cho*, Jun-Hyuk Nam*, Na-Ra Lee*, Hwi-Geon Cha*, Min-Chan Kang**, Won-Sik Moon*
Soongsil University*, LS ELECTRIC**

Abstract - This paper proposes Q_{UV} , the baseline-corrected time integral of the UVC optical sensor output, as a new indicator for quantifying the cumulative optical emission characteristics of series arc events. Peak amplitude has limited discriminative capability when the sensor output is saturated, while the number of threshold-crossing pulses is highly sensitive to threshold selection. The proposed indicator accumulates the positive deviation of the optical signal over the entire measurement interval, thereby representing both the saturation duration and repeated optical emissions as a single scalar value. When applied to UVC signals obtained from 16 repeated measurements under a 16A load condition, Q_{UV} ranged from 0.077 to 1.032V·s, corresponding to a dynamic range of 13.4. Even among the 13 tests in which the peak value reached the sensor saturation region, the proposed indicator maintained a discriminative capability of approximately 7.5. These results indicate that the proposed metric can quantify relative intensity differences among arc events that are difficult to distinguish using peak amplitude alone.

($\Delta t=0.8\mu s$)의 샘플링 속도로 총 10^6 개의 샘플(측정시간 $T=0.8s$)을 4채널 동기 측정하였다. CH1은 인가전압(60Hz), CH2는 부하 전류, CH3는 UVC 광 센서이다. 센서 출력 범위는 약 0~37V이며, 강한 광 입사 시 약 37V 부근에서 포화된다. 본 논문에서는 전극 재질·간극·접촉 분리 방식, 광 센서의 모델·감도·파장·아크 지점까지의 거리 및 입사각 등 광학적 측정 조건은 16회 반복실험 전체에서 동일하게 유지하였다. 측정 사양 요약은 표 1과 같다.

〈표 1〉 실험 측정 사양

Item	Value
Oscilloscope	Rigol DS
Sampling Rate	1.25MS/s
Sampling Interval Δt	0.8 μs
Measurement Duration T	0.8s(10^6 samples)
Load Current	16A
Number of Repeated Measurements	16
CH1	Applied Voltage(60Hz)
CH2	Load Current
CH3	UVC Optical Sensor

1. 서 론

저압 배전계통에서 발생하는 직렬 아크(series arc)는 절연 열화와 전기화재의 주요 원인이며, 부하전류와 유사한 파형을 보이기 때문에 전류·전압 정보만으로는 검출이 어렵다고 알려져 있다[1,2]. 이를 보완하기 위해 아크 플라스마로부터 방출되는 자외선 영역 광을 이용한 광학적 검출 기법이 연구되어 왔으며, 특히 UVC(200~280nm) 대역은 주변 조명·태양광에 거의 포함되지 않아 잡음에 강하다는 장점이 있다[3].

기존의 광 신호 기반 정량화 연구는 대부분 피크 진폭 V_{peak} 또는 임계값을 초과하는 펄스 개수 N_{pulse} 를 사용한다. 그러나 강한 아크에서는 UVC 광센서 출력이 포화되어 V_{peak} 가 동일한 값으로 고정되며, N_{pulse} 는 펄스 산정을 위한 순간 임계값 설정에 따라 값이 크게 변한다[4]. 또한 두 지표 모두 순간적인 강도만을 반영하므로, 광 방출이 지속되는 시간 정보와 반복성을 함께 표현하기에는 한계가 있다.

본 논문에서는 UVC 광 센서 출력의 베이스라인 보정 후 시간 적분량 Q_{UV} 를 직렬 아크 이벤트의 누적 광 방출 특성을 나타내는 정량지표로 제안한다. 제안 지표는 피크 진폭이 포화되는 경우에도 포화 지속시간과 반복적인 광 방출을 누적하여 반영할 수 있으며, 펄스 개수 산정을 위한 순간 임계값을 요구하지 않는다. 본 연구는 16A 부하 조건에서 16회 반복 측정한 UVC 신호에 제안 지표를 적용하여, 동일 조건 아크 이벤트 간 상대적 강도 변별 가능성을 평가하는 것을 목적으로 한다.

2. 실험 구성 및 데이터

2.1 측정 시스템

4채널 디지털 오실로스코프(Rigol DS)를 이용하여 1.25MS/s

2.2 데이터셋

부하전류를 16A로 고정된 조건에서 16회 반복 측정하여 16개의 데이터 파일을 획득하였다. 동일 부하·동일 회로 조건이라 하더라도 아크는 본질적으로 확률적 사건이므로 각 측정의 고아 신호 패턴은 상이하다. 본 연구는 이 16회 시도에 대해 Q_{UV} 의 분포를 비교함으로써 제안 지표의 변별력을 평가한다.

3. UVC 광량 적분 지표

3.1 물리적 해석

UVC 광 센서가 선형 동작 범위에 있을 때, 센서 출력 $V_{CH3}(t)$ 는 입사 UVC 광 플럭스 $\Phi(t)$ 에 비례한다. 따라서 베이스라인을 제거한 출력의 시간 적분량은 측정 구간 동안 센서가 수신한 상대적 누적 UVC 광량을 나타내는 지표로 사용할 수 있다. 다만 센서 포화 영역에서는 실제 복사에너지와 출력 전압 사이의 선형성이 제한되므로, 본 논문에서의 Q_{UV} 는 절대 복사에너지 값이 아니라 동일한 센서·회로 조건에서의 상대 정량지표로 해석한다.

3.2 베이스라인 정의

센서의 직류 오프셋과 완전한 드리프트를 제거하기 위해 측정 구간 전체 시계열의 10% 분위수(quantile)를 베이스라인으로 사용한다.

$$v_u = P_{10}(v_{CH3}(t)) \quad (1)$$

여기서 $P_{10}(\cdot)$ 은 시계열의 하위 10% 분위수이다. 이는 측정 초기부터 광 신호가 들떠 있는 경우에도 안정적인 기준점을 제공하며, 단순 평균 대비 임펄스성 아크 펄스에 대해 robust하다.

3.3 광량 적분 지표 정의

UVC 광량은 본질적으로 양의 물리량이므로, 베이스라인 대비 양의 편차만을 적분한다.

$$Q_{UV} = \int_0^T \max(v_{CHB}(t) - v_{b,0}) dt \quad [V \cdot s] \quad (2)$$

실제 이산 신호에 대해서는 다음과 같이 합산으로 계산한다.

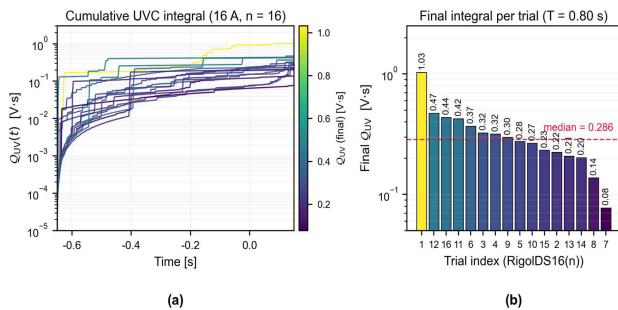
$$Q_{UV} \approx \Delta t \cdot \sum_{n=1}^N \max(v_{CHB}[n] - v_{b,0}) \quad (3)$$

또한 시간에 따른 누적량을 식(4)로 정의하면 dQ_{UV}/dt 가 급격히 증가하는 구간은 UVC 방출이 시작되는 시점과 대응하여 아크 점화 시각에 대한 시간 정보를 제공한다.

$$Q_{UV}(t) = \int_0^t \max(v_{CHB}(\tau) - v_{b,0}) d\tau \quad (4)$$

4. 결 과

16A 부하 16회 측정 데이터에 식 (1)-(4)를 적용한 결과를 그림 1과 표 2에 나타내었다. 그림 1(a)는 각 측정의 누적 광량 적분 곡선 $Q_{UV}(t)$ 를 로그 스케일로 도시한 것으로, 로그 표시를 위해 $Q_{UV}(t) + \epsilon (\epsilon = 10^{-6} V \cdot s)$ 를 사용하였다. 각 곡선의 급격한 계단형 상승 구간은 UVC 광 방출이 시작되는 시점에 대응하며, 이로부터 $Q_{UV}(t)$ 는 단일 스칼라로 압축되기 전 단계에서 아크의 시간적 발현 양상까지 보존함을 확인할 수 있다.



〈그림 1〉 CH3 UVC 광량 적분 결과
(a) 누적 적분 곡선, (b) 최종 Q_{UV} 비교

그림 1(b)는 각 측정의 최종 Q_{UV} 값을 큰 순으로 정렬한 막대 그래프이다. 16개 측정의 Q_{UV} 값은 $0.077 \sim 1.032 V \cdot s$ 범위에 분포 하였으므로, 최대값과 최소값의 비는 약 13.4, 중앙값은 $0.286 V \cdot s$ 이다. 이는 동일한 16A 부하 조건에서도 아크 이벤트의 누적 UVC 방출량이 크게 달라질 수 있음을 보여주며, 제안 지표가 반복 실험 감 상대적 아크 강도 차이를 정량화하는 데 활용될 수 있음을 시사한다. 사분위수를 기준으로 본 데이터를 분류하면 상위 25% 영역에 1, 11, 12, 16이 속하고, 하위 25% 영역에 7, 8이 속하여, Q_{UV} 만으로도 아크 이벤트의 강도 계층을 분리할 수 있을 가능성을 확인하였다.

〈표 2〉 Q_{UV} 통계(16A, n=16)

Statistic	Value
n(trials)	16
$Q_{UV, \min}$	$0.077 V \cdot s$ (#7)
$Q_{UV, \max}$	$1.032 V \cdot s$ (#1)
Mean $\pm$ Std	$0.331 \pm 0.209 V \cdot s$
Median	$0.286 V \cdot s$
Dynamic range(max/min)	13.4

Saturated cases($V_{\text{peak}} \geq 37V$)	13 / 16
Dynamic range(saturated only)	$7.5(0.137 - 1.032 V \cdot s)$

5. 결 론

본 논문에서는 UVC 광 센서 출력의 베이스라인 보정 후 시간 적분량 Q_{UV} 를 직렬 아크 이벤트의 누적 광 방출 특성을 나타내는 정량지표로 제안하였다. 16A 부하 조건에서 16회 반복 측정된 데이터에 적용한 결과, 제안 지표는 전체 데이터에서 13.4, 피크 포화 사례 내에서 7.5의 동적범위를 보여, 피크 진폭만으로 구분하기 어려운 아크 이벤트 간 차이를 정량화할 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 동일 조건 반복실험에 한정된 상대적 정량화 결과이며, 검출 성능에 대한 평가는 추가적인 비교군 데이터를 필요로 한다. 향후 연구에서는 Q_{UV} 기반 실시간 판정 알고리즘 개발을 수행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 한국산업기술기획평가원 2025년도
재난안전산업 기술사업화 지원 사업
(RS-202510742971)의 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] IEC 62606, General Requirements for Arc Fault Detection Devices, 2nd ed., International Electrotechnical Commission, 2017.
- [2] UL 1699, Standard for Arc-Fault Circuit-Interrupters, Underwriters Laboratories, 2017.
- [3] Wang, Guoming, et al. "Detection and analysis of series arc using non-conventional methods in low-voltage switchboards." Journal of Electrical Engineering 69.4 (2018): 317-322.
- [4] 조윤진, et al. "UVC 센서를 이용한 220V, 60Hz 직렬 아크의 Clearing Time 내 검출 성능 평가." 전기학회논문지 74.12 (2025): 2411-2418.