

## HFCT를 활용한 고전압직류송전 케이블 부분방전 위치추정

홍선민<sup>1</sup> · 손우영<sup>1</sup> · 천혜원<sup>1</sup> · 강대경<sup>2</sup> · 박종후<sup>1,+</sup>

### Detection and localization of partial discharge in high-voltage direct current cables using a high-frequency current transformer

Seonmin Hong<sup>1</sup>, Wooyoung Son<sup>1</sup>, Hyewon Cheon<sup>1</sup>, Daekyoung Kang<sup>2</sup>, and Jonghoo Park<sup>1,+</sup>

#### Abstract

Detection and localization of partial discharge are considered critical techniques for estimating the lifetimes of power cables. High-frequency current transformers (HFCTs) are commonly used for the detection of partial discharge in high-voltage alternating current (HVAC) power cables; however, their applicability is compromised by the limitations of the installation locations. HFCTs are typically installed in cable terminals or insulation joint boxes because HVACs induce strong time-varying magnetic fields around the cables, saturating the ferromagnetic materials in the HFCTs. Therefore, partial discharges near the installation locations can be detected. In this study, the feasibility of partial discharge detection using a HFCT was investigated for high-voltage direct current (HVDC) cables. We demonstrated that the HFCT could be installed at any location in the HVDC power cable to monitor partial discharge along the entire cable length. Furthermore, we showed that the HFCT could detect the location of partial discharge with high accuracy.

**Keywords :** Partial discharge, High-voltage direct current (HVDC) cable, High frequency current transformer (HFCT)

#### 1. 서 론

부분방전은 여러 고전압 전기설비의 절연체의 공극과 같은 결합에서 발생하는 국부적인 전기 방전현상으로 절연체의 열화 및 절연과피의 주된 원인 중 하나이다[1]. 부분방전은 전자파 및 음파 방사, 진류 펄스 생성, 온도 상승, 코로나 방전, 화학적 반응 등 다양한 물리·화학적 현상을 발생시키고 이러한 현상들을 측정함으로써 부분방전을 검출할 수 있다[2-7]. 여러 고전압 설비 중 고전압 전력 케이블은 주로 접근이 어려운 지중 또는 해저에 포설되어 고장 발생 시 고장 위치 탐지가 어렵고 복구에 많은 시간과 경제적 손실을 야기한다. 현재 대표적인 부분방전 센

서인 금속 막 센서와 HFCT (high frequency current transformer)가 고전압교류송전(high-voltage alternating current, HVAC) 케이블의 부분방전 검출에 사용되고 있으나, 이들 대부분의 센서는 전력 케이블의 종단 또는 중간 접속함에 설치되어 설치 위치로부터 일정 거리 안에서 발생한 부분방전만 검출할 수 있는 한계를 가진다[8, 9]. 최근 고전압직류송전 케이블은 대용량 장거리 전력수송에 효율적이고 국가 간 계통연계, 이종 주파수 계통 연계, 해상 풍력 발전 플랜트와 같은 신재생 에너지원과 지상의 전력 계통과의 연계가 용이한 장점을 가지고 있어 수요가 지속적으로 증가하고 있다[10]. 따라서 안정적인 HVDC 운영을 위해서 HVDC 케이블 전 구간에서 발생하는 부분방전을 실시간-온라인으로 탐지하고 부분방전의 위치까지 판별할 수 있는 센서 기술의 필요성이 크게 부각되고 있다. 이 논문에서는 HVDC 송전 시 케이블 주위에 시변 자기장이 생기지 않아 HFCT의 강자성체가 포화되지 않는다는 점에서 착안하여, HFCT를 HVDC 케이블에 직접 체결하여 부분방전을 검출할 수 있음을 검증하였다. 또한 두 개의 HFCT 센서를 이용하여 부분방전 발생 위치도 높은 정확도로 검출해 낼 수 있었다.

<sup>1</sup>경북대학교 전기공학과 (Department of Electrical Engineering, Kyungpook National University)

IT convergence Engineering Bldg 413, Kyungpook National University, 80 Daehakro, Bukgu, Seoul, 41566, Korea

<sup>2</sup>경북대학교 의생명융합공학과(Department of Biomedical convergence Science and Technology, Kyungpook National University)

Technopark, Kyungpook National University, 80 Daehakro, Bukgu, Seoul, 41566, Korea

<sup>+</sup>Corresponding author: jonghoopark@knu.ac.kr

(Received: Mar. 20, 2021, Accepted: Mar. 26, 2021)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

#### 2. 연구 방법

Fig. 1은 부분방전 실험 구성도를 보여주고 있다. 실험에 사

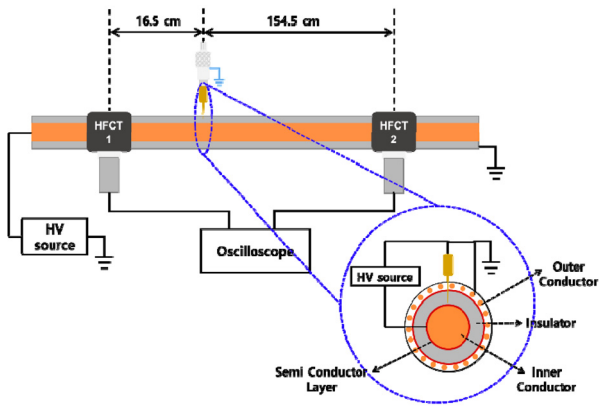


Fig. 1. Experimental setup for Partial discharge detection and localization, consisting of power cable, artificial defect, HFCTs, high voltage source, and oscilloscope.

용된 케이블은 22.9 kV 동심 중성선 케이블이며 도체(수밀 압축 연동연선), 내부 반도체층, 절연체 (XLPE), 외부 반도체층, 동심 중성선, 피복체(PVC)로 구성되어 있다. 케이블의 도체와 중성선에 고전압이 인가되며, 중성선은 마이크로 매니플레이터에 연결된 침전극과 전기적으로 연결되어 있어 일정 크기이상의 DC 전압이 인가되면 부분방전이 발생되게 구성하였다. 또한, 마이크로 매니플레이터를 사용하여 침전극과 도체 사이의 거리 조절하여 부분방전 발생 전압 조절을 가능하게 구성하였다. 실험에 사용된 HFCT의 민감도와 주파수 대역은 각각 1 pC와 2-200 MHz이다. 부분방전 발생지점을 기준으로 좌우에 HFCT를 설치하여 부분방전에 의해 발생된 전류펄스가 양쪽의 HFCT 센서에 도달하는 시간 차이를 이용하여 부분방전 위치 검출이 가능하게 구성하였다. HFCT1은 부분방전 발생위치에서 오른쪽으로 16.5 cm 떨어진 곳에 설치하고, HFCT2의 위치는 변경해가며 두 HFCT의 출력을 오실로스코프로 출력 데이터를 수집했다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 부분방전 발생 위치로부터 -16.5 cm와 +154.5 cm 거리에 설치된 두 개의 HFCT로부터 검출한 부분방전 신호이다. X 축의 t=0 지점은 오실로스코프의 트리거가 작동한 시점이다. 부분방전 신호는 특정 주파수로 진동하며 신호의 크기는 시간이 지남에 따라 점차 감소하는 특성을 보이고 있다.

Fig. 3은 두 파형의 상승지점을 확대한 그림이며, 부분방전 발생 위치로부터 더 먼 거리에 설치된 HFCT2에 부분방전 신호가 11.018 ns 늦게 도착함을 확인할 수 있다. HFCT2의 위치를 변경해가면서 총 10번의 측정을 수행하였고, 부분방전 발생 위치로부터 HFCT2의 위치가 멀어질수록 HFCT1과 HFCT2에 도달하는 부분방전 신호의 시간 차이가 커짐을 확인하였다.

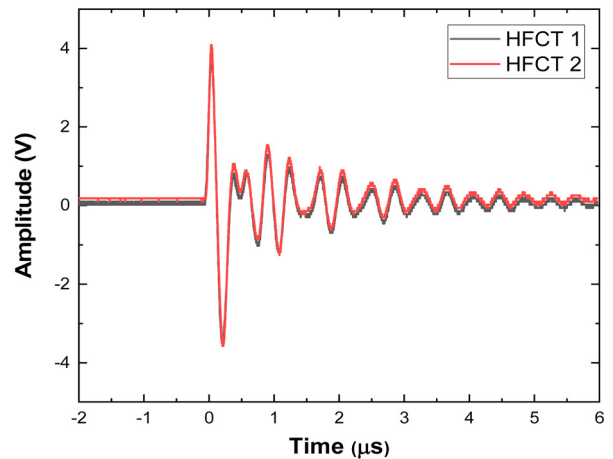


Fig. 2. Partial discharge signal obtained by two HFCTs located on different distance from the artificial defect in the power cable.

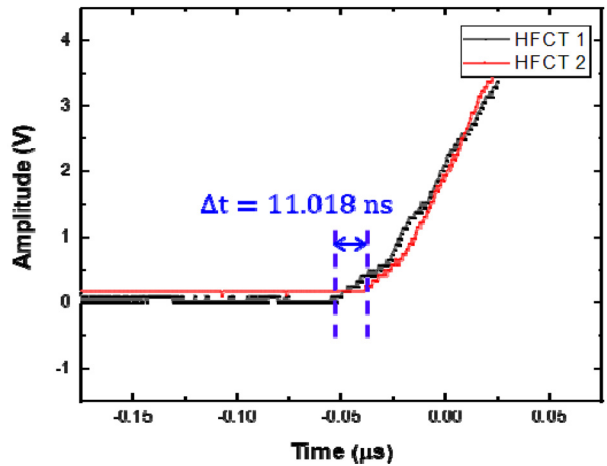


Fig. 3. Magnified view near the onset of partial discharge signal in Fig. 2.

또한 부분방전 신호의 평균 전파 속력은 12.63 cm/ns임을 확인할 수 있었다. 부분방전 신호의 평균 전파 속도 ( $v$ ), 두 센서에 도달하는 부분방전 신호의 도착시간 차이 ( $t_1-t_2$ ), 두 센서 간의 거리 ( $l$ )를 사용하여 부분방전 발생 위치( $x$ )를 아래의 식을 사용하여 구할 수 있다.

$$x = \frac{1}{2} \{l + v(t_1 - t_2)\} \tag{1}$$

평균 전파 속력과 Fig. 2의 시간차이를 사용하여 역으로 검출한 부분방전의 위치는 15.92 cm로 실제 부분방전 위치인 16.5 cm의 96.49% 정확도로 부분방전의 위치를 검출하였다.

Fig. 4는 부분방전 신호의 주파수 스펙트럼을 보여준다. 부분방전 신호의 주된 주파수 성분은 2.48 MHz와 3.6 MHz로 측정되었다.

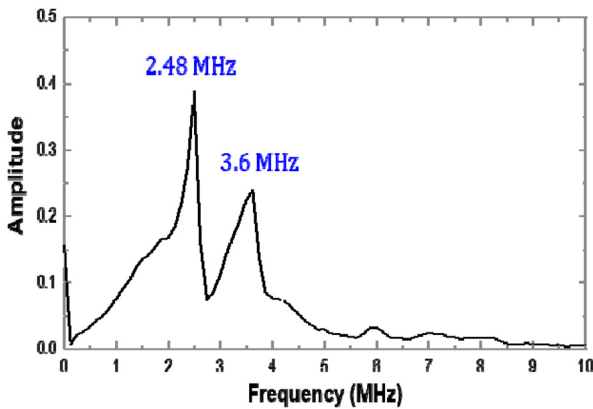


Fig. 4. Frequency spectrum of partial discharge signal obtained by HFCT.

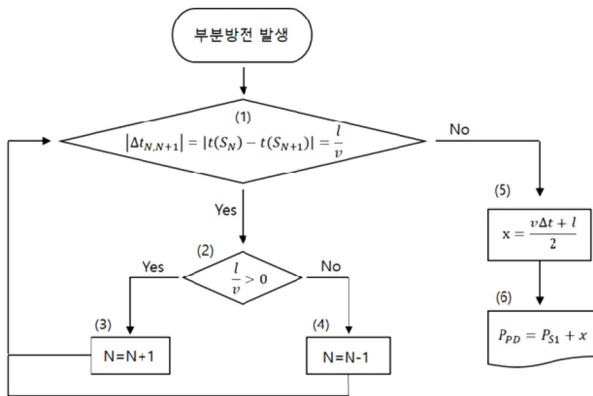


Fig. 5. Algorithm for localization of partial discharge for the array of HFCTs.

케이블 전구간에서 부분방전의 위치는 여러 개의 HFCT를 일정 간격으로 설치하고 아래의 알고리즘을 사용하여 검출할 수 있다. 알고리즘에 사용된 파라미터는 아래와 같이 정의된다.

- T(S<sub>N</sub>): N번째 HFCT에 도달하는 부분방전 신호의 도착시간
- l: 인접한 두 HFCT간의 거리
- v: 부분방전 신호의 전파속도
- PPD: 부분방전 발생 위치
- PS<sub>N</sub>: N번째 HFCT의 위치
- x: N번째 HFCT로 부터의 거리

알고리즘 각 단계의 설명은 아래와 같다.

- (1) N 번째와 N+1 번째 센서에 도달하는 부분방전 신호의 도착시간 차이가  $l/v$ 이면, 부분방전은 그 두 센서 사이에서 발생하지 않은 것임.
- (2) 만약 N 번째와 N+1 번째 센서에 도달하는 부분방전 신호의 도착시간의 차이가 양수이면 부분방전은 N+1 번째 센서 오른쪽에서 발생한 것임.

(3) 따라서, N+1 번째와 N+2 번째 센서의 도착시간 차이를 확인해야 함. 따라서 (1) 조건이 거짓일 때까지 N 값을 1 증가시킴.

(4) 만약 N 번째와 N+1 번째 센서에 도달하는 부분방전 신호의 도착시간의 차이가 음수이면 부분방전은 N 번째 센서 왼쪽에서 발생한 것이어서, N-1 번째와 N 번째 센서의 도착시간 차이를 확인해야 함. 따라서 (1) 조건이 거짓일 때까지 N 값을 1 감소시킴.

(5) 만약 N 번째와 N+1 번째 센서에 도달하는 부분방전 신호의 도착시간 차이가  $l/v$ 이 아니면, 부분방전은 N 번째와 N+1 번째 센서 사이에서 발생한 것임.

(6) 부분방전은 N 번째 센서의 위치에서 (5)에서 구한 x 값만큼 오른쪽에 위치에서 발생한 것임.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 HVDC 케이블에서 발생하는 부분방전을 HFCT로 검출하고 부분방전의 위치를 높은 정확도로 검출하였다. HFCT는 HVAC에 적용 시 강한 시변 자기장으로 인하여 케이블의 중단 또는 중간 접속함의 접지연결선에 설치되어 전력케이블 전 구간 부분방전 모니터링에 한계를 가지나, HVDC 케이블 부분방전 검출에 적용 시 시변 자기장이 없어 케이블의 구조변형 없이 어느 위치에나 설치하여 부분방전을 높은 민감도로 검출 가능하고 여러 개의 HFCT를 일정 간격으로 설치하여 부분방전의 위치 검출까지 가능하다는 것을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 2018년 선정 기초연구개발 과제 연구비에 의해 지원되었음(과제번호: R18XA06-63)

#### REFERENCES

- [1] I.E.C. Standard, *High Voltage Test Techniques: Partial discharge Measurement*, IEC-60270, pp. 13-31, 2000.
- [2] P. A. A. F. Wouters, P. C. T. Laan van der, E. Hetzel, and E. F. Steennis, "New on-line PD measurement technique for polymer insulated cables and accessories", *Proc of 8th Int. Symp. on High Voltage Engineering*. pp. 105-108, Yokohama, Japan, 1993.
- [3] N. H. Ahmed and N. N. Srinivas, "On-line partial discharge detection in cables", *IEEE-DEI Trans.*, Vol. 5, No. 2, pp. 181-188, 1998.
- [4] B. T. Phung, Z. Liu, T. R. Blackburn, and R. E. James, "On-line partial discharge measurement on high voltage power cables", *Proc. of 11th Int. Symp. on High Voltage Engineering*. pp. 328-332, London, UK, 1999.

- [5] Z. Liu, B.T. Phung, T. R. Blackburn, and R. E. James, "The propagation of partial discharge pulses in a HV cable", *Proc. of AUPEC/EECON eds*, pp. 287-292 Darwin NT, Australia, 1999.
- [6] E. F. Steennis, F. van den Boogaard, C. G. N. de Jong, M. J. M. van Riet, and G. P. T. Van der Wijk "Learning from high-voltage XLPE cable system testing and monitoring", *CIGRE*, pp. 21-203, 2000.
- [7] W. Wei, Z. Sen, C. Bin, and L.En-heng, "The study of on-line PD detector in power cable", *Proc. of 6th Int. Conf. on Properties and Applications of Dielectric Materials*, pp. 177-180, Xian, China, 2000.
- [8] A. Rodrigo, P. Llovera, V. Fuster, and A. Quijano, "Influence of High Frequency Current Transformers Bandwidth on Charge Evaluation in Partial Discharge Measurements", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 18, No. 5, pp. 1798–1802, 2011.
- [9] A. Rodrigo, P. Llovera, V. Fuster, and A. Quijano, "Study of Partial Discharge Charge Evaluation and the Associated Uncertainty by Means of High Frequency Current Transformers", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 19, No. 2, pp. 434–442, 2012.
- [10] D. Jovicic, *High voltage direct current transmission: Converters, Systems and DC Grids, 2nd ed.*, John Wiley & Sons, NJ, pp. 1-12, 2019.