

전력케이블의 절연결함에 따른 부분방전 특성분석

Analysis of PD Characteristics by Types of Insulation Defects in Power Cables

최재성* 박찬용* 김선재* 한주섭** 길경석†
Jae-Sung Choi Chan-Yong Park Sun-Jae Kim Ju-Seop Han Gyung-Suk Kil

ABSTRACT

This paper described partial discharge (PD) patterns depending on types of insulation defects in CNCO-W cable(Concentric Neutral Cross-linked Polyethylene Insulated Polyolefin-Water Proof Sheathed Power Cable). The PD measurement system consists of a coupling network, a detection impedance, and a low noise amplifier. A 16 bit, 250 MS/s data acquisition system was used to analyze PD patterns. To simulate insulation defects in a power cable, a needle with the curvature radius of 10 μm was inserted into the insulation part. We measured phase (Φ), magnitude (q), and counts (n) of PD pulse for the defects, and classified PD patterns using the PRPD (Phase Resolved Partial Discharge) method. From the analysis of acquired PD signals, we could find that a unique PD pattern is formed according to the types of defect.

1. 서 론

전력사용이 급증하면서 설비의 대용량화와 고전압화로 전력사고의 발생 또한 급증하고 있다. 특히 고압설비가 단락, 지락 및 기타 원인에 의해 정전으로 확산될 경우, 대형화될 가능성이 높다. 안정적인 전력공급을 위해 IEC를 중심으로 전기분야별로 규격화가 진행되고 있을 뿐만 아니라, 전력설비 진단기술에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다[1]~[3].

발/변전소 및 대형공장 등에는 많은 전력기기들이 사용되고 있으며, 이들 기기들로부터 다양한 요인에 의한 전력사고들이 발생하고 있다. 특히 전력용 케이블의 경우 수배전반 내에서 접촉 불량, 절연물의 절연내력 저하 등으로 인해 각종 사고를 유발하거나, 고품질의 전력공급에 치명적인 영향을 미치고 있다. 케이블의 절연열화는 초기단계에 부분방전을 수반하며 이러한 부분방전 신호를 검출함으로써 케이블의 절연상태 및 교체시기를 판정할 수 있다. 또한 절연체 내에 존재하는 결함의 종류에 따라 방전형태와 크기, 위상이 달라지므로 이를 분석함으로써 결함의 유무는 물론 그 형태 또한 유추할 수 있다[4].

본 논문에서는 전력용 케이블에서 발생 가능한 결함을 모의하기 위하여 22.9 kV 동심중성선 수밀형 무독성 난연 전력케이블(22.9 kV, FR CNCO-W)을 이용한 침, 보이드, 플로팅(particle)에 대한 모의전극을 제작하였다. 또한 PC기반의 DAQ(Data Acquisition) System을 이용하여 모의결함으로부터 발생하는 부분방전(Partial Discharge, PD)신호를 검출하고, PRPD(Phase Resolved Partial Discharge)기법을 적용하여 결함에 따른 PD신호의 위상분포, 크기 그리고 발생횟수에 대한 특성을 분석하였다.

† 책임저자 : 정회원, 한국해양대학교 전기전자공학부, 교수
E-mail : kilgs@hhu.ac.kr

TEL : (051)410-4414 FAX : (051)403-1127

* 정회원, 한국해양대학교 전기전자공학부, 석사과정

** 정회원, 한국해양대학교 산업기술연구소, 전임연구원

2. 실험계의 구성

실험계의 구성은 그림 1과 같다. 실험용 전원으로 60Hz의 정현파(Max 5 kVrms)를 사용하였으며, 전원으로부터 유입되는 전도 노이즈의 영향을 최소화하기 위해 인입단에 NCT(Noise Cut Transformer)와 line filter를 설치하였다. 인가전압은 고전압 프로브(Tektronix P6015A, 75 MHz, 20 kVDC)에 의해 측정되며, PD신호의 측정에는 주파수대역 2 kHz ~ 30 MHz인 HFCT (High Frequency Current Transformer)를 사용하였다. 검출된 PD신호는 대역통과필터와 증폭회로를 거쳐 PC기반의 DAQ System(16 bit, NI PXI 5114, 250 MS/s National Instruments)으로 전송된다.

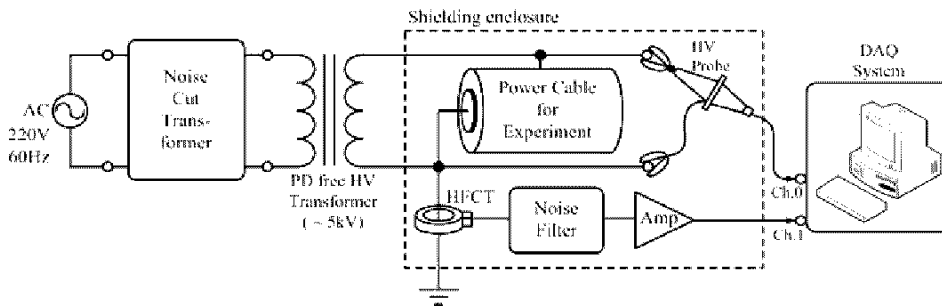
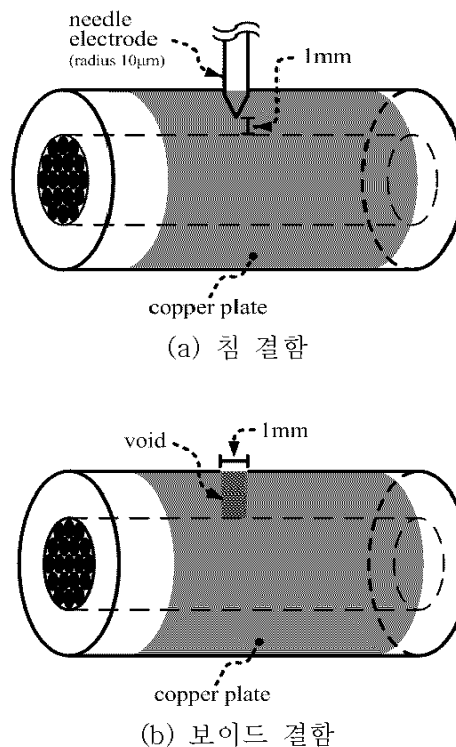
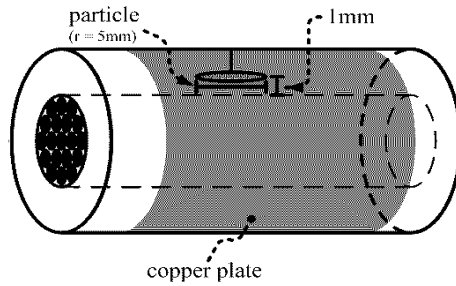


그림 1. 실험계의 구성

케이블 내에서 발생 가능한 결함을 모의하기 위하여 그림 2와 같이 침, 보이드, 플로팅 전극을 제작하였다. 침 전극과 도선과의 거리는 1mm가 되도록 배치하였으며, 보이드 전극은 도선과 수직방향으로 1mm의 공극을 케이블 표면에 천공하였다. 또한 내부 파티클(particle)에 의한 플로팅(floating) 결함을 모의하기 위해 원형동판($r=5\text{ mm}$)을 절연체 내부에 삽입하고 외부표면을 에폭시로 절연하였다. 도선과의 거리는 침전극과 같은 1mm이다. 제작된 시료는 0.5 mm두께의 동판으로 케이블을 감싸고 동판에 전압을 인가하여 케이블 절연체에 고전계가 형성되도록 하였다.

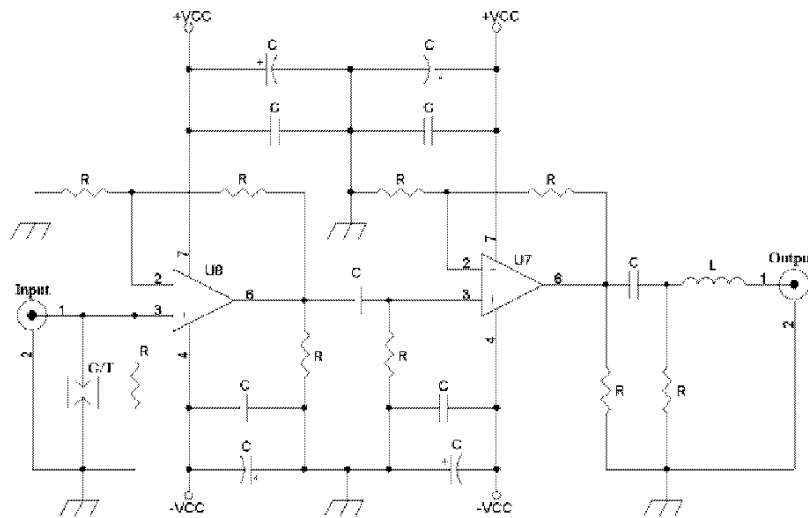




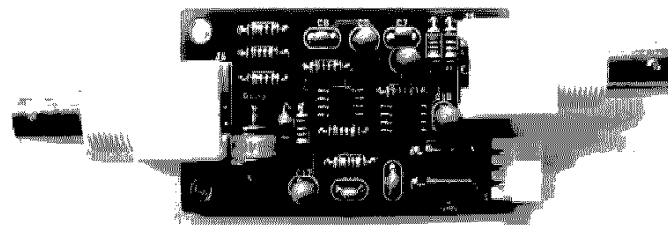
(c) 플로팅 결합

그림 2. 시료의 제작

부분방전신호는 그 크기가 아주 미소하므로 고정도 검출을 위해서는 저잡음 특성의 증폭회로가 필요하다. 따라서 저잡음, 고이득 특성의 증폭회로를 HFCT의 출력단에 접속하였다. 증폭회로는 주파수대역 500 kHz ~ 30 MHz (-3 dB)의 증폭회로를 2단으로 구성하여 40 dB의 이득을 갖도록 설계·제작하였다. 시제작한 저잡음 증폭회로의 회로도나 사진을 그림 3에 나타냈다.



(a) 회로도



(b) 시제작 증폭회로

그림 3. 저잡음 증폭회로

3. 결과 분석

각각의 결합에 대한 실험은 외부 방사노이즈에 대한 영향을 최소화하기 위하여 차폐함 내에서 수행되었으며, 전압을 4 kVrms까지 상승시키면서 PD발생을 모의하였다. 증폭회로를 통해 측정된 PD신호는 DAQ System을 통해 일정시간(1000 cycle)동안 수집된다. 저장된 PD신호는 PRPD기법을 통해 PD신호의 위상분포(Φ), 크기(q) 그리고 발생횟수(n)에 대한 특성을 분석하였다. 각각의 결합에 따른 PD신호의 특

징들은 다음과 같다.

(1) 칩 결함

칩 결함에서 측정 결과를 그림 4에 나타내었다. 전체 측정주기 동안 약 34,500회의 PD가 발생하였으며 제작된 모의결합들 중 가장 많은 수의 PD펄스가 측정되었다. 대부분의 PD펄스가 위상 $0^\circ \sim 120^\circ$, $180^\circ \sim 300^\circ$ 사이의 정극성에서 발생하였으며, 위상 80° 부근에서 최고 방전펄스(2.552 V)가 발생하였다. 부극성 펄스에 비해 정극성 펄스가 최대 4배가량 높게 측정되었다. 이는 칩예한 끝부분에서 전계 집중이 용이한 침전극과 그에 비해 집중도가 낮은 구리 도선간의 물성차이에서 기인한 현상이라 사료된다[5].

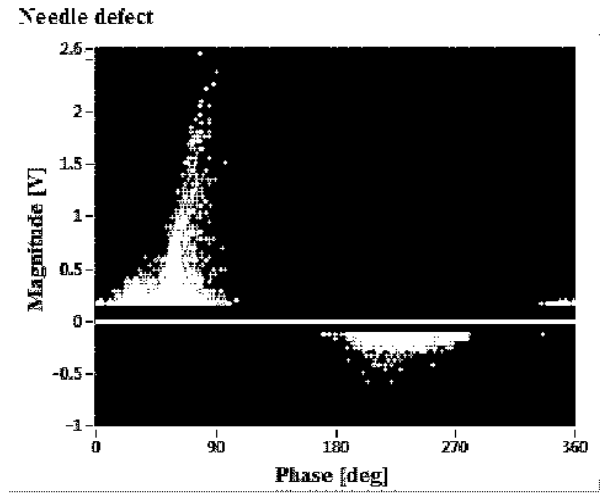


그림 4. 칩 결함에서의 PD펄스 누적분포

그림 5는 칩 결함에서의 Φ - q - n 패턴분석 결과를 나타낸 것으로서 PD펄스 누적분포도만으로는 판별하기 어려운 특징들을 나타낸다. 최고 방전펄스가 발생한 구간은 누적분포도에서도 나타나 있듯이 $60^\circ \sim 90^\circ$ 의 위상이지만 가장 많은 PD펄스가 발생한 구간은 $210^\circ \sim 240^\circ$ 의 위상임을 알 수 있다. 또한 인가전압의 상승률이 급준한 $30^\circ \sim 60^\circ$ 와 $210^\circ \sim 240^\circ$ 위상에서 PD펄스가 군집하는 것을 알 수 있다.

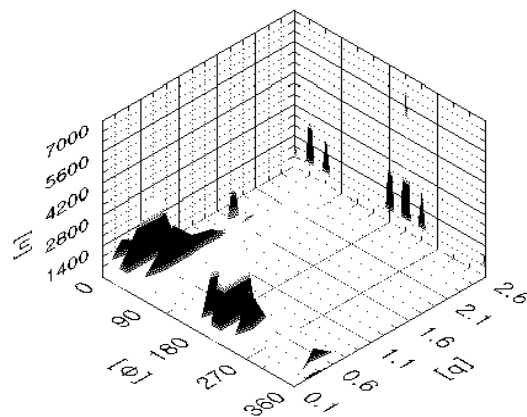


그림 5. 칩 결함에서의 Φ - q - n 패턴

(2) 보이드 결함

보이드 결함에 대한 측정결과를 그림 6에 나타내었다. 다른 결함에서의 방전형태와 달리 $30^\circ \sim 120^\circ$,

210°~270°의 가장 좁은 위상범위에서 PD펄스가 분포함을 알 수 있다. 전체방전 횟수 또한 약 550회 정도로 가장 작은 수의 PD가 발생하였으며, 최고 방전펄스(312 mV)는 위상 75°부근에서 측정되었다. 인가전압의 극성에 대한 방전크기를 비교해 볼 때 정극성에서 최고 방전펄스가 부극성의 1.2배 정도로 거의 유사한 방전 전하량을 가지며, 군집 형태 또한 정·부극성 모두 반원형으로 형태를 가진다. 이는 케이블을 감싼 동판과 케이블 중심에 위치한 구리 도선의 곡률이 동일하여 평등전계를 형성하기 때문에 정극성과 부극성에서의 PD펄스 형태가 유사하다고 판단된다[5].

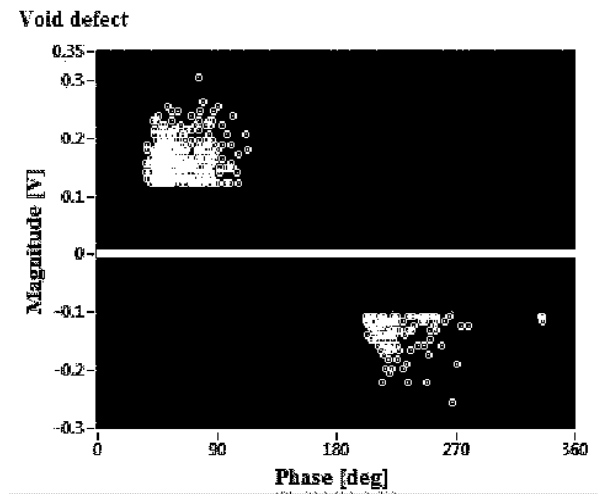


그림 6. 보이드 결함에서의 PD펄스 누적분포

보이드 결함에 대한 Φ -q-n 패턴분석을 그림 7에 나타내었다. 정극성의 반주기(30°~60°)에서 PD펄스가 집중적으로 발생하였으며, 최고 방전펄스가 발생한 위상에서 가장 많은 수의 PD가 측정되었다.

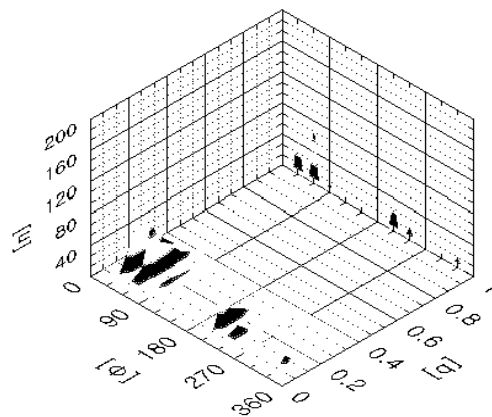


그림 7. 보이드 결함에서의 Φ -q-n 패턴

(3) 플로팅 결함

그림 8은 플로팅 결함에서의 PD신호이다. 전체 측정주기 동안 약 16,000회의 PD펄스가 발생하였으며, 대부분 위상 30°~120°와 180°~300°에서 존재하며 침 결함의 경우와 유사한 경향을 나타낸다. 정극성 PD펄스의 크기가 부극성에 비해 2배가량 높게 측정되었으며, 위상 70°부근에서 최고 방전펄스(1.25

V)가 측정되었다. 넓은 범위의 방전위상, 작은 방전전하량, 많은 방전횟수 등 일반적인 플로팅 전극이 가지는 특징과 유사한 것을 그림 8에서도 확인할 수 있다[5].

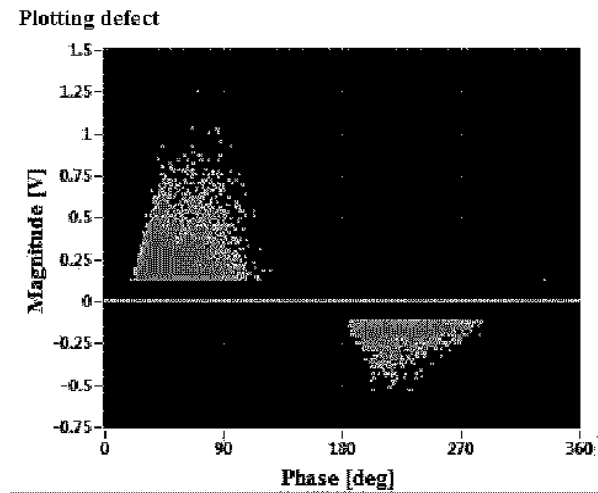


그림 8. 플로팅 결함에서의 PD펄스 누적분포

플로팅 결함에서의 Φ - q - n 패턴분석의 결과를 그림 9에 나타내었다. 다른 두 결함에서 검출된 PD패턴과는 달리 정극성과 부극성에서 발생한 PD의 횟수가 약 7950회와 8050회로 거의 동일하게 측정되었으며, 인가전압의 상승률이 급준하는 위상($30^\circ \sim 60^\circ$, $210^\circ \sim 240^\circ$)에서 대부분의 PD가 발생하였다. 최고 방전펄스가 측정된 위상(70°)과 가장 많은 PD펄스가 발생된 위상($210^\circ \sim 240^\circ$)이 서로 다른 것을 그림 9로부터 확인할 수 있다.

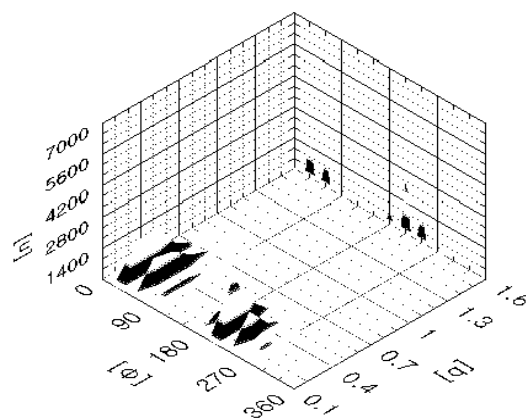


그림 9. 플로팅 결함에서의 Φ - q - n 패턴

4. 결 론

본 논문에서는 전력용 케이블에서 발생 가능한 침 결함, 보이드 결함, 플로팅 결함을 모의하였으며 결함의 종류에 따른 PD신호를 분석하였다. 또한 미소한 방전신호를 검출하기 위해 저잡음 증폭회로를 설계·제작하였다. PC기반의 DAQ system을 통하여 저장된 PD신호는 PRPD기법을 이용한 Φ - q - n 패턴분

석 그래프와 누적분포도로 나타내었다. 이를 통해 PD신호의 위상분포, 크기 그리고 발생횟수를 동시에 고려하여 각 결함별 특성을 분석하였다.

(1) 침 결함

· 가장 많은 PD펄스(약 34,500회)가 발생하였고 누적분포도가 정극성을 기준으로 침과 같은 뾰족한 형태를 보인다.

· 최고 방전펄스(2.552V)는 정극성(80° 부근)에서 검출이 되지만 가장 많은 PD가 발생한 위상은 부극성(210° ~ 240°)이다.

(2) 보이드 결함

· 반원형태의 PD펄스 누적분포가 정극성과 부극성에서 모두 나타났다.

· 최대 방전펄스(312 mV)가 발생한 위상(75° 부근)과 가장 많은 횟수의 PD가 발생한 위상(30° ~ 120°)이 동일하다.

· 다른 두 전극에 비해 매우 낮은 횟수(약 550회)의 PD가 검출되었다.

(3) 플로팅 결함

· 넓은 위상(30° ~ 120°, 180° ~ 300°)에서 고르게 PD가 분포하였다(약 16000회).

· 정극성에서의 PD발생 횟수(약 7950회)와 부극성에서의 횟수(약 8050회)가 거의 동일하게 나타났다.

상기의 결과는 실험실 단위의 모의전극에서 취득된 기초적인 정보로써 효과적인 절연진단을 위해서는 좀 더 구체적인 연구가 진행되어야 할 것이다. 또한 다양한 환경에서 정보가 취득된다면 전력용 케이블의 절연진단에 유용하게 적용될 것으로 판단된다.

감사의글

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

참고문헌

- [1] Y. Ehara, M. Naoe, K Yrano, H. Kishida, M. Matsuyam and T. Ito, (1998) "Fractal Analysis of the Treeing Process from Luminous Discharge image and Measurement of Discharge Magnitude" IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, No.5, pp.728-733
- [2] A. Kelen and M. G. Danikas, (1994) "Evidence and Presumption in PD Diagnostics", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, pp.780-795
- [3] T. Okamoto and T. Tanaka, (1995) "Auto-correlation Function of PD Pulses under Electrical Treeing Degradation", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, pp.857-874
- [4] Greg C. Stone, Edward A. Boulter, Ian Culbert and Hussein Dhirani (2004), "Electrical Insulation For Rotating Machines", A JOHN WILEY & SONS, INC., publication.
- [5] Dr F. H. Kreuger (1990), "Parial Discharge Detection in High-Voltage Equipment", Butterworths-Heinemann.