

전력기기의 부분방전 진단



이준호
호서대학교 전기과 교수

1. 서론

부분방전(partial discharge, 이하 PD)은 절연체가 파괴되기 전에 국부적으로 발생하는 방전으로 정의된다. 일반적으로 PD는 절연체내의 보이드나 강한 전계가 집중되는 곳에서부터 시작되며, 절연시스템 내부의 상태를 외부로 전달할 수 있는 중요한 물리량 중 하나이다. 따라서 전력케이블, 변압기, GIS(gas insulated substation)등과 같은 전력기기에서 발생하는 부분방전을 정확히 측정하고 이를 올바르게 해석하는 작업은 신뢰성있는 진단법을 개발하고 이를 현장에 적용하는데 있어 대단히 중요한 과제이다. PD를 이용한 전력기기의 진단을 수행함에 있어서는 크게 그림 1과 같은 5단계의 과정을 거치게 된다.

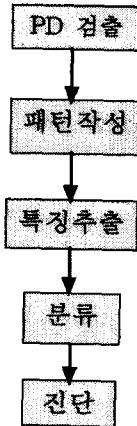


그림 1 PD를 이용한 전력기기 진단의 과정

2. 방전의 형태

일반적으로 방전은 결합의 형태에 따라서 다음 3가지 부류로 나눌 수 있다.

- 1) 내부방전(internal discharges)
- 2) 표면방전(surface discharges)
- 3) 코로나방전(corona discharges)

그림 2는 결합의 형태와 방전신호 분류를 나타낸 것이다. 내부방전



내부방전



표면방전



코로나 방전

그림 2. 결합의 형태와 방전신호

은 고체유전체 내부에 존재하는 보이드(void)에 의해 발생하는데 대개의 경우 보이드는 가스로 채워져 있다. 표면방전은 유전체의 경계면에 접선선분의 상당한 전계가 가해질 때 발생한다. 계면은 기체 또는 액체와 경계를 하고 있다. 코로나방전은 금속이 뾰족하게 튀어나온 부분이 존재하여 이곳에 전계가 국부적으로 집중되어 발생한다.

3. PD의 검출

그림 3은 유전체 내부에 보이드가 존재할 경우와 그것의 전기적 등가회로이다. 이 그림에서 C_v 는 보이드의 용량성분, C_s 는 보이드에 직렬연결된 용량성분, C_p 는 직렬연결된 C_v 와 C_s 에 병렬연결된 유전체의 용량성분을 표시한다. 일반적으로 각 용량의 크기는 $C_p \gg C_v \gg C_s$ 의 관계에 있다. PD검출을 위한 회로는 여러 가지가 있지만 기본적으로는 그림 4와 같은 원리를 적용하게 되며 각 요소들은 다음과 같다.

- 1) 가능한 자체적인 방전이 없는 고전압원
- 2) PD측정을 위한 시료
- 3) 펄스검출을 위한 임파던스
- 4) 고주파 전류임펄스 통과를 위한 결합콘덴서 (coupling capacitance)
- 5) 신호증폭을 위한 앰프
- 6) 디스플레이를 위한 장치, 보통은 오실로스코프를 사용

일반적으로 PD의 검출은 주파수 대역이 250kHz 이하인 방전검출기를 사용한다. 이러한 검출기는 상용화된 것이 많으며 간단한 회로를 이용하여 직접 장치를 구현할 수도 있다.

4. 특징추출 및 분류

PD신호는 시간의 변화에 대한 펄스의 크기로 검출된다. 그러나 일반적으로 운전중인 전력기에는 60Hz(일부 국가에서는 50Hz)의 교류전압이 인가되므로 시간의 변화는 주기적으로 반복된다고 볼 수 있다. 따라서 하나의 PD 신호를 표현할 수 있는 기본인자(basic factor)는 방전의 크기 q (amplitude)와 방전이 발생한 위상각 ψ (phase)를 규정지을 수 있다. 여기에 추가하여 PD 신호는 특별한 경우(예를들어 수 msec 이내의 짧은 시간에 파괴로 진행되는)를 제외하고는 일정시간 인가전압의 주파수에 따라 반복적으로 발생하므로 평균적으로 1초에 몇 번 발생하는가를 나타내는 발생빈도 n (repetition rate)을 고려할 수 있다.

4.1 위상각 정보를 이용한 패턴

이 방법은 전통적인 방전검출기를 이용하고 그림 5와 같이 sine파에서 발생하는 방전패턴을 분석

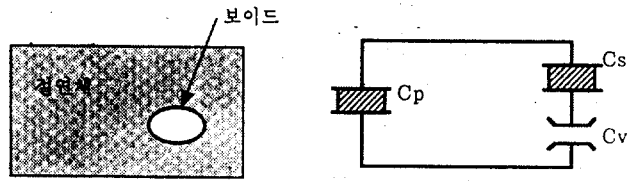


그림 3. 보이드가 존재하는 유전체와 그 전기적 등가회로

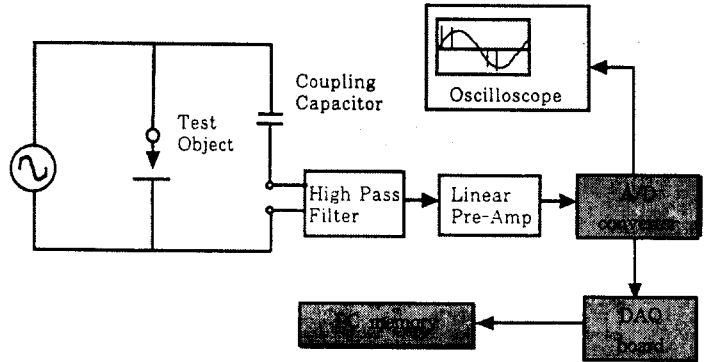


그림 4. PC 검출 기본회로

하는 것이다. 이는 그림 4에서 나왔던 타원형 펄스분포와 매우 유사함을 보이고 있다. 패턴에서의

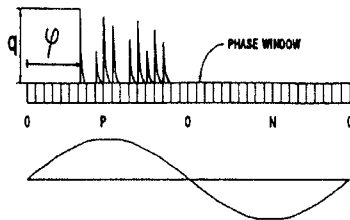


그림 5. 위상각 정보를 이용한 PD패턴구성

각 방전펄스는 방전이 발생하는 곳의 물리적인 의미를 반영하며 이 패턴과 방전을 일으키는 결합의 형태사이에는 매우 긴밀한 연관성을 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 현재까지 실용적인 측면에서 가장 널리 채용되고 있는 방법이다. 또한 이 방법은

결합과 검출기사이의 전기적 경로(path)에 무관하며, 검출회로를 이용하여 방전펄스의 상대적인 크기와 위상각을 검출할 수만 있다면 어떠한 복잡한 구조의 전력기에서 신호가 발생하여도 유효한 방법이다. 즉 위상각 ψ 와 방전의 크기 q 의 관계를 검출하는 것이 최대의 관련이 된다. 또한 같은 이유에서, 이 방법에서는 방전펄스 하나하나의 모양에는 큰 의미가 없으며 이 펄스상호간의 상대적 크기와 위상각이 중요한 단서를 지니고 있다. 따라서 이 방법의 경우 검출기의 시분해능(time resolution)이 패턴의 신뢰성을 결정하는 중요한 요소가 된다. 그림 5는 이 방법에 대한 개념도이다.

4.2 개별 펄스파형의 분석

최근 계측기기 특히 A/D 변환기의 sampling rate의 향상으로

5. 진 단

위에서 설명한 바와 같이 측정된 PD 패턴으로부터 특징을 추출하게 되면 이를 근거로 전력기기의 상태를 진단하게 된다. 지금까지의 연구의 방향은 크게 두가지가 있는데 첫째는 실제의 상황에서 존재할 수 있는 결함에 대한 모델 결함을 제작하여 이들로부터 PD 신호를 검출 분석하여 데이터베이스를 구축한 후 진단을 요하는 기기로부터의 검출신호를 데이터베이스의 신호와 비교분석하여 진단하는 방법이다. 두 번째로는 최근에 많은 시도가 이루어지는 방법으로 신경회로망이론이나 퍼지이론 등의 패턴인식기법을 이용하는 방법들로 신경회로망의 경우 비선형성이 강한 문제의 해법에 우수한 인식도를 보인다는 점과 더불어 사전의 정보가 신경망 자체에 학습된 상태이므로 따로 데이터베이스를 구축할 필요가 없고 판단이 신속하다는 장점이 있다. 그러나 학습되지 않았거나 학습된 패턴에 비해 변형이 크게된 패턴에 대한 유연성 확보에 있어서는 아직도 개선할 점이 많다. 퍼지이론의 적용은 이러한 유연성의 제고, 즉 정확함 일치성을 보이지는 않으나 유사성을 보이는 패턴사이의 관련성을 인정한다는 장점이 있다. 그림 7 은 3층으로 구성된 신경회로망의 그림으로 입력으로는 서론에서 설명하였던 PD신호의 기본요소로 구성된 3차원 ψ -q-n 패턴을 이용하고 출력으로는 진단하고자 하는 결함의 형태를 학습시킨다. 이러한 구조의 신경회로망은 역전파 알고리즘(back propagation algorithm)을 적용한 것이고 학습된 패턴에 대해서는 매우 우수한 인식결과를 출력하는 것으로 알려져 있다.

인하여 매우 빠르게 변화하는 신호의 검출이 쉬워지게 됨에 따라 PD 펄스 하나하나의 모양을 관찰하는 연구에 큰 진전을 보이고 있다. 특히 주파수대역이 500MHz 이상인 검출회로를 사용하여 시간 분해능력을 향상시킨 파형 관찰에 대한 연구결과들도 발표된 바 있다. 이 경우 결함부분에서 발생하는 방전파형은 nanosecond 정도의 짧은 신호이며 이러한 신호를 제대로 검출하기 위해서는 sampling rate가 수 Gs/s 인 A/D 변환장치가 필수적이다. 이렇게 검출된 신호는 PD가 발생하는 결함의 방전 메카니즘에 대한 정보와 함께 방전에 의한 열화의 진전 과정을 설명할 수 있는 정보를 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 실용적인 측면에서는 많은 어려움을 가지고 있는 방법이다. 특히 원래신호에 대한 왜곡을 최소화하기 위해서는 매우 정교한 고주파검출회로를 구상하여야 한다. 또한 결함과 검출회로 사이에서 펄스의 왜곡이 발생하기 쉬우므로 전력용 변압기와 같이 그 구조가 복잡한 전력기기에서는 적용이 어렵다. 따라서 이 글에서는 위상각정보를 이용한 PD 패턴을 중심으로 설명을 해 나갈 것이다.

4.3 특징추출

위에서 설명한 PD pattern을 이용하여 전문가가 기기의 상태를 진단할 경우 생각해 보자. 이때 전문가가 축적된 경험에 의해 패턴으로부터 결함의 종류와 관련이 있는 어떠한 특징들을 몇가지 추출하여 이를 토대로 종합적인 결론을 내릴 것이다. 그러나 많은 PD 신호가 짧은 시간에 검출되어 들어올 경우는 전문가의 진단능력을 넘어설 수 있을 것이다. 따라서 최근에는 이러한 진단을 자동화하려는 연구들이 활발히 수행되

고 있다. 이런 연구에서 진단의 출발점은 검출된 패턴으로부터 기기의 결함의 형태와 관련성이 있는 특징을 잘 추출해 내는데 있다. 기존의 연구에서 널리 사용되는 특징으로서는 최대방전량, 평균방전크기, 방전개시전압 이외 통계학으로부터 응용한 개념인 왜도(skewness), 첨도(kurtosis), 상관계수(cross correlation factor) 등이 있다. 이러한 개념은 일종의 연산자(operator)로써의 역할을 하며 수학적인 정의는 다음 식과 같다.

왜도

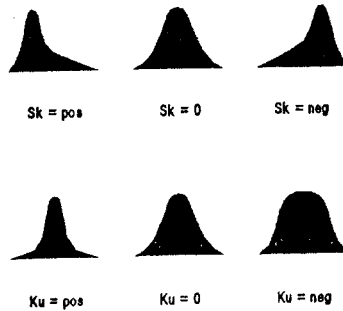


그림 6. 왜도와 첨도의 개념도

$$S_k = \frac{\sum (x_i - \mu)^3 \cdot p_i}{\sigma^3}$$

첨도

$$K_u = \frac{\sum (x_i - \mu)^4 \cdot p_i}{\sigma^4} - 3$$

여기서 x_i 는 측정된 값, p_i 는 i 번째 위상각에서 x_i 값이 나타날 확률, μ 는 평균값, σ 는 분산이다. 왜도는 패턴의 비대칭성의 정도를 의미하며 첨도는 패턴의 뾰족한 정도를 의미한다. 그림 6 은 왜도와 첨도를 설명한 그림이다.

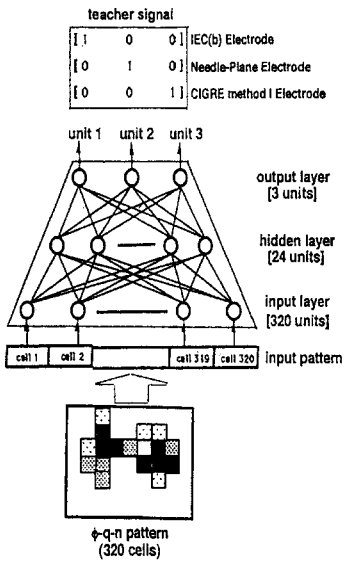


그림 7. PD패턴을 이용한 기진단의 신경회로망

6. 결 론

PD 신호는 기기의 절연상태를 외부에 알려줄 수 있다는 점에서 이론적으로는 진단에 대단히 유효한 물리량이다. 따라서 전력기기의 진단이라는 주제에는 예외없이 PD라는 용어가 따라다닌다. 그러나 실제의 시스템에 적용하기 위해서는 극복하여야 할 많은 문제들이 놓여 있는데 가장 기본적인 과제는 PD의 정확한 검출과 검출된 신호를 이용한 진단방법의 확보일 것이다. 검출방법의 경우 그 원리는 전기적으로 매우 간단하나 실제 측정시에는 외부잡음의 중첩, 측정회로의 의한 신호의 왜곡등의 현상이 일어난다. 이러한 하드웨어적인 문제를 해결하는 것은 신뢰성있는 진단을 위한 선결과제이다.

일단 측정된 PD신호로 부터는 진단의 근거를 위한 특징들을 추

출하여야 한다. 특징추출은 이 글에서 간단히 설명한 연산자 이외에 매우 다양한 특징을 추출할 수 있으며 최근 이에 대한 우수한 결과들이 많이 발표되고 있다. 이 분야에서는 통계학이나 신호처리, 패턴인식 등과 같은 학문으로부터 유용한 개념들을 응용하는 것도 하나의 방법이 될 것이다.

최종적으로는 기기의 진단을 위해 수집된 정보를 종합적으로 분석하여 신뢰성 있는 진단 알고리즘을 개발하여야 한다. 이 분야에 있어서는 기존의 알고리즘에 대한 보완과 함께 최근 등장하는 신경회로망, 퍼지알고리즘, 웨이블릿(wavelet)이론 등의 응용이 활발히 이루어지고 있다.

진단은 하나의 현상 현상만을 기준으로 이루어질 수는 없기 때문에 보다 다양한 방법이 시도되어야 할 것이며 또한 방전 및 고전압의 기술에 다른 학문분야의 개념들을 적절히 융용함으로써 보다 신뢰성 높고 신속한 진단법의 개발이 이루어 질 것으로 기대된다.

본 연구실에서는 전력기기의 진단에 관해 공동의 관심을 토의하기 위해 web site를 다음과 같이 오픈하였으며 이 분야에 관심있는 분들의 많은 이용을 바랍니다. <http://highvolt.hoseo.ac.kr>

참 고 문 헌

1. F. H. Kreuger, Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment, Butterworths, 1989.
2. A. Krivda, "Automated Recognition of Partial Discharge", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.

2, pp. 796-821, 1995.

3. F. H. kreuger, E. Gulski and A. Krivda, "Classification of Partial Discharges", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 28, pp. 917-931, 1993.
4. June-Ho Lee and T. Okamoto, "A Study on the PD Patterns from Multi-Defect Insulating Systems", Journal of EEIS, Vol. 3, pp. 170-173, 1998.
5. June-Ho Lee, N. Hozumi and T. Okamoto, "A New Standardization Method for PD Pattern Recognition using Neural Network", Journal of KIEE, Vol. 8, pp. 34-41, 1995.
6. S. A. Boggs, "Partial Discharge: Overview and Signal Generation", IEEE Elect. Insul. Mag., Vol. 6, No. 4, pp. 33-39, 1990.
7. M. Hoof, B. Freisleben and R. Patsch, "PD Source Identification with Novel Discharge Parameter using Counter-propagation Neural Network", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4, pp. 17-32, 1995.
8. P. H. F. Morshuis, Partial Discharge Mechanisms, Ph. D thesis, Delft University of Technology, Netherlands, 1993.
9. T. Okamoto and T. Tanaka, "Novel Partial Discharge Measurement Computer-aided Measurement Systems", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 7, pp. 1015-1019, 1986.

< 이준호 위원 > < 김정태 위원 >