

TDR을 이용한 극초단파 대역에서 절연유 유전을 측정

구선근, 주형준, 박기준, 한기선, 윤진열
한전 전력연구원

Measurement of the permittivity of insulation oil at UHF Band using TDR Method

Sun-geun Goo, Hyungjun Ju, Kijun Park, Kiseon Han, Jin-yul Yoon
Korea Electric Power Corporation, Korea Electric Power Research Institute

Abstract - Time Domain Reflectometry(TDR) 기법을 응용하여 극초단파 대역을 포함하는 광대역 주파수범위에서 절연유의 유전을 쉽게 측정할 수 있는 기법을 제안하였다. 수 GHz 이상의 대역에서의 절연유 유전은 전자파를 이용한 전력용 변압기 부분방전 발생위치 추정에 필수적인 정보이나 기존의 방법으로 간단히 측정할 수 없었다. 본 기법은 동축구조에서 전자파 진행속도가 절연매질 유전율의 함수로 인가된 펄스파의 매질에 대한 동축선로에서 진행시간을 계산함으로써 유전을 구하는 간단한 방법이다. 제안한 새로운방법을 이용해 절연유중 1종4호 신유의 경우 광대역에서의 유전은 2.1임을 알 수 있었다.

$$\Delta t = t_{oil} - t_{air} = \frac{D}{C} (\sqrt{\epsilon_{r,oil}} - \sqrt{\epsilon_{r,air}}) \quad \text{식 (3)}$$

$$\rightarrow \epsilon_{r,oil} = \left(1 + \frac{\Delta t \cdot C}{D}\right)^2$$

t_{oil} : 길이 D이고 절연유 매질의 동축선을 신호가 통과하는데 걸리는 시간
 t_{air} : 길이 D이고 공기 매질의 동축선을 신호가 통과하는데 걸리는 시간
 $\epsilon_{r,oil}$: 절연유의 비유전율
 $\epsilon_{r,air}$: 공기의 비유전율(=1)

1. 서 론

가스절연개폐장치의 예방진단기법으로 오랫동안 연구되어 왔던 극초단파(Ultra High Frequency, 0.3 ~ 3 GHz 대역) 대역의 전자파를 이용한 부분방전 측정기술이 널리 보급되어 실 변전소에 성공적으로 적용이 되고 있다 [1]. 이러한 성공을 바탕으로 동일 기술을 전력용 변압기의 예방진단에 적용하고자 하는 노력이 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 가스절연개폐장치에서의 경우 방전위치 추정을 위해 전자파 방전신호가 부분방전센서에 도착하는 시간을 이용하는 Time of arrival(TOA)기법은 높은 정확도를 보여주어 신속한 방전결함 제거 및 개폐장치 보수를 가능케 한다 [2]. 그러나 1차원적인 가스절연개폐장치와는 달리 절연유로 충전된 3차원 구조물인 변압기는 몇 가지 기술적인 난제를 극복해야만 가스절연개폐장치에서 보여주었던 정확한 방전위치 추정이 가능하다. TOA 기법을 이용하려면 전력기기 내 전자파 부분방전신호의 전파속도를 알아야 방전발생위치의 계산이 가능하나 전파속도는 매질의 유전율에 의해 결정되는데 수 MHz 이하에서 전력용 변압기의 절연유 유전은 쉽게 측정이 가능하나 [3] 전자파 전파매질로서의 수 GHz 대역에 걸친 유전은 간단히 측정할 수 없었다. 본 논문은 극초단파 대역을 포함하는 광대역의 주파수범위에서 유전을 측정을 TDR을 이용해 쉽고 간단히 측정할 수 있는 방법을 제안함으로써 전력용 변압기에서 전자파를 이용한 방전위치 추정에 이용코자 한다.

2. 본 론

2.1 유전을 측정방법 개요

비유전율 ϵ_r 인 동축선에서 TEM(Transverse Electromagnetic) mode의 전파속도 v 는 식 (1)과 같다.

$$v = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{at } \tan\delta \ll 1 \quad \text{식 (1)}$$

C: 진공에서의 광속도
 ϵ_r : 비유전율
 $\tan\delta$: 유전정접

따라서 길이가 D인 동축선에서 신호가 통과하는데 소요되는 시간 t 는 식 2와 같이 동축선 매질에 대한 비유전율의 제곱근에 비례한다.

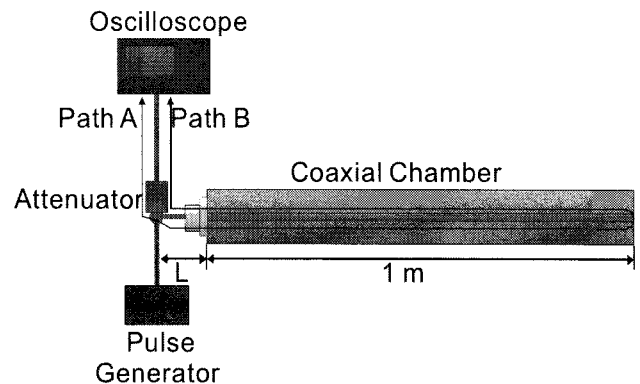
$$t = \frac{D\sqrt{\epsilon_r}}{C} \quad \text{식 (2)}$$

D: 전자기파가 진행하는 경로의 길이

만약 동일길이의 동축선에서 매질이 절연유 및 공기일 때의 신호통과시간을 각각 t_{oil} 및 t_{air} 라 하면 절연유의 비유전율 $\epsilon_{r,oil}$ 는 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

2.2 유전을 측정장치의 구성

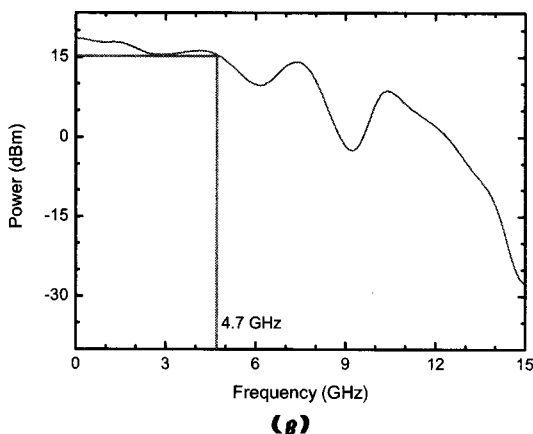
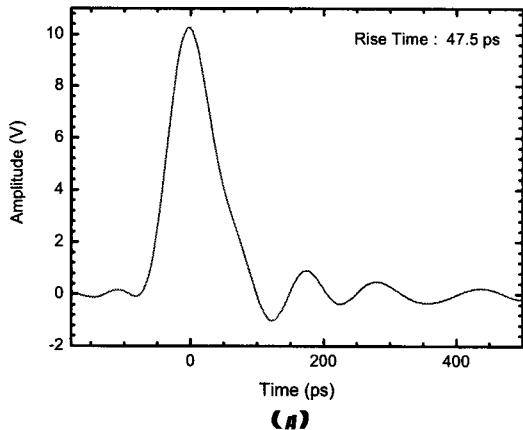
절연유의 유전을 측정장치를 그림 1과 같이 구성하였다. 먼저 펄스발생기(pulse generator, Picosecond Lab, 10050A)에서 그림 3과 같은 펄스신호를 발생시킨다. 발생한 펄스의 상승시간은 47.5 ps이고, 3 dB bandwidth는 4.7 GHz로 UHF 대역에서 충분한 크기의 주파수 분포를 가진다. 펄스의 모양은 실제 변압기 등에 발생하는 방전신호와 유사한 모양이다. 발생한 펄스는 T분기를 통해 일부는 감쇠기(attenuator, 12 dB, 1 ~ 12 GHz)를 거쳐 오실로스코프(Tektronix TPO71254)로 입력되고(그림 1의 path A), 일부는 1 m 길이의 공기 또는 절연유가 충전된 동축챔버(coaxial chamber)에 입력된 후 동축챔버 종단에서 반사되어 감쇠기를 거친 후 오실로스코프에 입력된다(그림 1의 path B). 따라서 펄스의 경로에 따라 오실로스코프에 측정된 시간차 t 는 두 경로의 차이인 $D'(=2 \times (L+1)m)$ 를 펄스가 진행하는데 소요되는 시간이다. 이렇게 동축챔버에 공기를 충전한 후의 시간차 t'_{air} 를 측정하고 절연유(1종4호, 신유)를 충전한 후 t'_{oil} 를 측정한다. t'_{air} 및 t'_{oil} 는 공기 또는 절연유가 충전된 경로인 동축챔버를 왕복하는 시간 t_{air} 또는 t_{oil} 와, T분기에서 동축챔버 사이의 길이 L을 왕복하는데 소요되는 시간 t_0 로 구성된다.



<그림 1> 절연유 유전을 측정장치의 구성.



<그림 2> 동축챔버의 모습.



〈그림 3〉 펄스발생기에서 발생한 펄스의 모양 (a) 펄스의 파형, (b) 펄스의 주파수분포.

2.3 경로별 펄스 진행 시간차 측정 및 유전율 계산

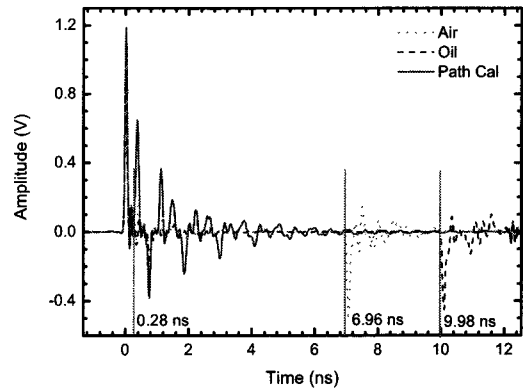
그림 1의 동축챔버 내 매질을 공기 및 절연유를 각각 충전한 후 오실로스코프로 펄스를 측정하면 그림 4의 점선 및 파선 그래프와 같이 매질별로 두개의 펄스를 측정할 수 있었다. 공기 및 절연유에서 두개의 펄스시간차 t'_{air} 및 t'_{oil} 는 각각 6.96 ns 및 9.98 ns로 측정되었다. 측정된 시간은 전술한 바와 같이 길이 $2 \times (L+1)m$ 펄스가 진행하는데 걸리는 시간이므로 길이 L 을 왕복하는데 소요되는 시간 t_L 을 t'_{air} 및 t'_{oil} 에 빼 주면 순수하게 매질별로 동축챔버를 왕복하는데 걸리는 시간 t_{air} 및 t_{oil} 를 구할 수 있다.

t_L 을 구하기 위해 그림 1의 구성에서 동축챔버를 분리시킨 후 펄스발생기로부터 진행된 펄스를 그림 4의 실선과 같이 측정하였다. 이때 처음 두 펄스의 경로차는 L 이 되므로 두 번째 펄스의 도착시간 0.28 ns가 길이 L 을 진행하는데 걸리는 시간 t_L 이 된다.

이를 이용해 t_{air} 및 t_{oil} 는 각각 6.68 ns 및 9.70로 계산되었다. 측정된 시간의 정확도를 알기 위해 식 (2)를 이용하여 1 m 길이의 기중 매질의 동축챔버를 왕복하는 걸리는 시간을 이론적으로 계산하면 6.67 ns로 측정된 t_{air} 와 10 ps 오차내에서 일치하였다. 발생한 오차는 펄스도착시간을 측정하는 오실로스코프의 샘플링간격에 의해 발생할 수 있다. 측정된 t_{air} 및 t_{oil} 와 경로차 ($D = 1m$)를 식 (3)에 대입하면 극초단파대역을 포함하는 광대역에서 절연유의 유전율은 2.1임을 알 수 있었다.

3. 결 론

TDR 기법을 이용하여 극초단파 영역에서 절연유의 유전율을 쉽게 측정할 수 있는 기법을 제안하였다. 제안된 방법은 공기에서의 펄스진행시간과 절연유에서의 진행시간을 비교하여 절연유의 유전율을 산출하며, 짧은 측정시간과 높은 정확도로 절연유의 유전율을 측정할 수 있었다. 제안된 방법은 절연유 외에 다른 유체의 극초단파영역에서의 유전율도 측정할 수 있으며, 향후 본 방법을 이용하여 절연유의 종류 및 열화정도별로 측정된 극초단파대역의 유전율은 변압기내 방전위치 추정기법 개발에 유용하게 쓰일 예정이다.



〈그림 4〉 오실로스코프에서 측정된 펄스의 파형. 점선(...): 공기로 충전된 동축챔버를 연결했을 때 측정된 파형, 파선(---): 절연유로 충전된 동축챔버를 연결했을 때 측정된 파형, 실선: 동축챔버를 제거후 측정된 파형.

【참 고 문 헌】

- [1] 구선근 등. "UHF 부분방전 상시감시시스템 실변전소 실증시험" 제 37회 대한전기학회 하계학술대회 초록집, APP-3, 2006
- [2] B. F. Hampton & R. J. Meat, "Diagnostic Measurements at UHF in Has Insulated Substations", IEE Proceedings, No. 135, No.2, p141, 1988
- [3] C. T. Dervos, C. D. Paraskevas & P. Skafidas, "Dielectric Characterization of Power Transformer Oils as a Diagnostic Life Prediction Method", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 21, No. 1, pp11-19, 20