

TDR을 이용한 극초단파 대역에서 사용 절연유의 유전율과 전파속도 측정

論 文

57-11-19

Measurement on the permittivity and propagation velocity of used insulation oil at UHF Band using time domain reflectometry

具 嬋 根[†] · 朱 炯 俊^{*} · 朴 基 濬^{***} · 韓 基 善^{**} · 尹 珍 烈^{***}

(Sun-Geun Goo · Hyoung Jun Ju · Kijun Park · Ki-Seon Han · Jin-Yul Yoon)

Abstract - We measured the permittivity and electromagnetic wave propagation velocity of used insulation oil with wide frequency range including ultra-high frequency by time domain reflectometry. The permittivity or propagation velocity is essential for locating discharge faults of oil filled power transformer. We derived 2.21 as a permittivity and 2.03×10^8 m/s as a velocity from the measurement of pulse travelling time along a coaxial line filled with used insulation oil or air. The permittivity measurement system we designed shows high measurement accuracy and the convenience for field use.

Key Words : Permittivity, Used Insulation Oil, Propagation Velocity, Time Domain Reflectometry

1. 서 론

고전압 전력기기는 고장의 징후로써 부분방전을 발생시키는 경우가 많다. 따라서 부분방전으로부터 발생하는 전자기파 신호를 측정함으로써 전력기기의 고장을 사전에 예방할 수 있다[1]. 특히 가스절연개폐장치의 경우 예방진단기법으로 부분방전에서 발생하는 극초단파(Ultra High Frequency, 0.3 ~ 3 GHz 사이의 주파수) 대역의 전자기파를 측정하는 기술이 널리 보급되어 실 변전소에 성공적으로 적용하고 있다[2]. 이러한 성공을 바탕으로 동일 기술을 전력용 변압기의 예방진단에 적용코자 하는 노력이 세계적으로 활발히 진행되고 있다[3, 4].

전력기기에서 방전을 일으키는 결함은 일반적으로 크기가 작아 결함의 정확한 위치를 모를 경우 전자기파 부분방전신호를 측정해도 방전결함을 발견하고 제거하기에 많은 어려움이 있어 방전발생위치의 추정은 전력기기 예방진단기술의 핵심 요소이다. 가스절연개폐장치의 경우 방전발생위치 추정을 위해 전기파 방전신호가 광속으로 개폐장치 내부를 진행한 후 부분방전센서들에 도착하는 시간이 방전발생위치와 센서간의 거리와 비례함을 이용해 방전발생위치를 계산하는 time of arrival(TOA)기법을 주로 사용하는데, 이 기법의 정확도가 높아 신속한 방전결함 제거 및 보수를 가능케 하였다[2]. 그러나 3차원 구조에 절연유로 채워진 전력용 변압기는 절연유 매질 하에서 극초단파대역을 포함하는 광대역에서 방전신호의 전파속도를 알아야 TOA기법을 이용해 결

함위치를 정확히 추정할 수 있다.

극초단파대역을 포함하는 광대역의 주파수분포를 가지는 펄스를 동축선로에 입사한 후 반사되는 신호의 특성을 분석하는 time domain reflectometry(TDR)를 이용해 절연유와 같은 유체의 광대역에서 전자기파 전파속도 및 유전율을 계산할 수 있는데, 본 논문에서는 운전중인 변압기에서도 TOA법을 이용해 방전결함위치를 추정할 수 있도록 TDR법으로 운전중인 변압기에서 채취한 절연유에 대해 전자기파 신호의 전파속도 및 유전율을 구하고자 한다[5, 6].

2. 이론 및 실험

2.1 동축선로에서 유전율 및 전자기파 전파속도

비유전율 ϵ_r 인 동축선로에서 TEM(Transverse Electromagnetic) mode의 전파속도 v 는 자유공간에서의 전파속도와 같이 식 (1)로 표현할 수 있다[7].

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

C : 진공에서의 광속도

ϵ_r : 비유전율

$\tan \delta$: 유전정접

따라서 길이가 D 인 동축선로를 전자기파 신호가 통과하는데 소요되는 시간 t 는 식 (2)와 같이 동축선로 매질에 대한 비유전율의 제곱근에 비례한다.

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

D : 전자기파가 진행하는 경로의 길이

† 교신저자, 正會員 : 韓電 電力研究院 先任研究員

E mail : freeon@kepri.re.kr

* 正會員 : 韓電 電力研究院 一般研究員

** 正會員 : 韓電 電力研究院 先任研究員

*** 正會員 : 韓電 電力研究院 責任研究員

接受日字 : 2008年 8月 21日

最終完了 : 2008年 9月 23日

만약 동일 길이 D 의 동축선로에서 매질이 절연유 또는 공기일 때의 신호 통과시간을 각각 t_{oil} 및 t_{air} 라 하면 절연유의 비유전율 $\epsilon_{r,oil}$ 및 전자기파의 전파속도 v_{oil} 은 식 (3)과 같이 t_{oil} 및 t_{air} 의 비로 구할 수 있다.

$$\frac{t_{air}}{t_{oil}} = \sqrt{\frac{\epsilon_{r,air}}{\epsilon_{r,oil}}} = \frac{v_{oil}}{v_{air}}$$

$$\rightarrow \epsilon_{r,oil} = \left(\frac{t_{oil}}{t_{air}}\right)^2 \quad (3)$$

$$\rightarrow v_{oil} = \frac{t_{air}}{t_{oil}} v_{air}$$

t_{oil} : 절연유 매질의, 길이 D 인 동축선로를 신호가 통과하는데 걸리는 시간

t_{air} : 공기 매질의, 길이 D 인 동축선로를 신호가 통과하는데 걸리는 시간

$\epsilon_{r,oil}$: 절연유의 비유전율

$\epsilon_{r,air}$: 공기의 비유전율(=1)

v_{oil} : 매질이 절연유인 동축선로에서 TEM 모드의 전파속도

v_{air} : 매질이 공기인 동축선로에서 TEM 모드의 전파속도 (= 3.00×10^8 m/sec)

2.2 TDR을 이용한 사용유의 유전율 및 전파속도 측정방법과 실험구성

TDR법을 이용해 광대역의 주파수 범위에서 절연유와 같은 유체의 전자기파 전파속도 및 유전율을 측정할 수 있다 [5, 6]. 먼저 TDR법을 이용한 절연유의 유전율 측정장치를 그림 1과 같이 구성하였다. 펄스발생기(Picosecond Lab, 10050)에서 그림 2와 같은 상승시간이 47.5 ps이고, 3 dB 대역폭이 4.7 GHz로 극초단파 대역에서 충분한 크기의 주파수 성분을 가진 펄스신호를 발생시킨다[5]. 발생된 펄스는 T분기를 통해 일부는 감쇠기(12 dB, 1 ~ 12 GHz)를 거쳐 오실로스코프(Tektronix, DPO71254)로 입력되고(그림 1의 path A), 일부는 T 분기를 거쳐 30 cm 길이의 공기 또는 절연유 약 130 cc가 채워진 동축챔버(coaxial chamber)에 입력된 후 동축챔버 종단에서 반사(reflection)되어 감쇠기를 거쳐 오실로스코프에 입력된다(그림 1의 path B). 따라서 동축챔버의 전파매질이 각각 공기와 절연유일 때 신호의 전파경로 A와 B에 따라 오실로스코프를 통해 시간영역(time domain)에서 측정된 두 펄스의 시간차 t'_{air} 또는 t'_{oil} 는 전파경로 A와 B의 경로차를 전자기파가 진행하는데 소요되는 시간이며, 이는 동축챔버를 왕복하는 시간 t_{air} 또는 t_{oil} 와 T분기에서 동축챔버 사이의 길이 L 을 왕복하는데 소요되는 시간 t_{2L} 로 구성된다.

t_{2L} 을 측정하기 위해 그림 1의 유전율 측정장치로 부터 동축챔버를 분리시킨 후 전술한 펄스를 인가시켜 오실로스코프로 파형을 측정하면 경로 A와 B에 따라 두개의 펄스가 측정되는데 이때 두 경로의 차는 $2L$ 이 되므로 두 펄스의 시간차는 t_{2L} 이 된다. 이를 t'_{air} 또는 t'_{oil} 에 빼주어 t_{air} 또는 t_{oil} 를 구한 후 식 (3)에 대입하면 절연유의 유전율 및 전파속도를 구할 수 있다.

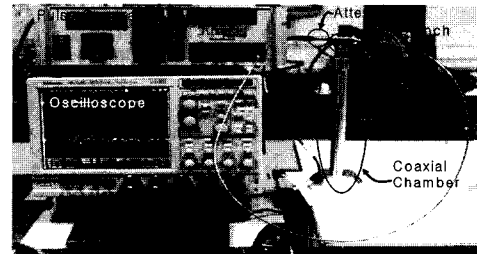
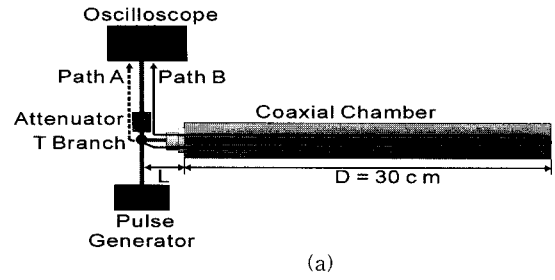


그림 1 절연유 유전율 측정장치의 구성. (a) 유전율 측정장치 개념도, (b) 유전율 측정장치의 실제 구성.
 Fig. 1 Permittivity measurement system for insulation oil. (a) concept of permittivity measurement system and (b) picture of permittivity measurement system.

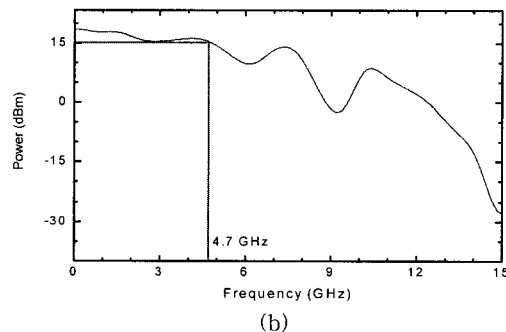
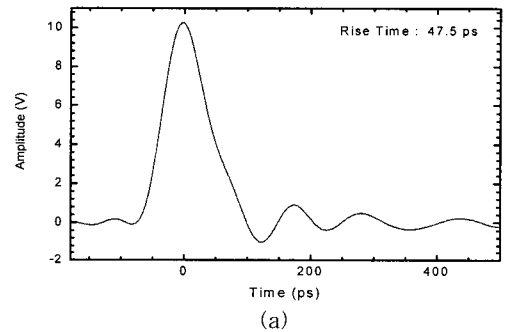


그림 2 펄스발생기에서 동축선로에 입력되는 펄스의 모양. (a) 펄스의 파형, (b) 펄스의 주파수분포.
 Fig. 2 Pulse shape generated by pulse generator. (a) waveform and (b) spectrum of the pulse.

3. 결과 및 검토

그림 1에서 공기가 충전된 동축챔버에 펄스를 입사시킨 후 최소 실시간 샘플링간격이 20 ps인 오실로스코프로 그림 3과 같이 펄스신호를 측정하였다. 그림 1의 경로 A에 의해 첫 번째 펄스가 도착한 후 경로 B로 전파한 두 번째 펄스가 도착한 시간 t'_{air} 는 2.34 ns였으며, 동축챔버를 분리시킨 후 측정된 두 번째 펄스의 도착시간 t_{2L} 은 0.34 ns였다. 따라서 전자기파가 순수하게 공기로 충전된 동축챔버를 왕복하는 시간 t_{air} 는 2.00 ns가 된다. 동축챔버의 길이가 30 cm 이므로 식 (2)에 의해 이론상 동축챔버를 전자기파가 왕복하는 시간은 2.00 ns 이며 TDR기법으로 측정된 왕복시간 t_{air} 와 정확히 일치한다. 이는 본 논문에서 사용한 길이 30 cm의 동축챔버는 기존 연구에서 사용한 동축챔버와 달리 특성임피던스의 불연속구간이 작아 동축챔버의 구조에서 발생하는 측정오차는 거의 없으며, 대부분의 측정오차는 오실로스코프의 샘플링 간격으로부터 발생함을 보여준다[6].

유전율과 전자기파 전파속도 측정대상으로 4개의 전력용 변압기로부터 수집하여 한국전력공사 전력연구원에서 표 1과 같이 유증가스분석을 수행한 사용유를 활용하였다. 각 사용유를 동축챔버에 채운 후 그림 2의 펄스를 인가하여 그림 3과 같이 오실로스코프로 각 경로별 펄스를 측정하였다. 경로 A로 전파한 펄스가 오실로스코프에 도착한 후 경로 B로 전파한 펄스가 도착한 시간 t'_{oil} 는 절연유별로 3.30 ns 또는 3.32 ns였다. 4종의 사용유에 대한 비유전율과 전자기파의 전파속도를 계산하면 각각 2.21 ± 0.03 및 $(2.03 \pm 0.01) \times 10^8$ m/s 이다.

표 1 사용유의 가스분석 결과 및 비유전율, 전자기파 전파속도(3 dB 주파수범위: 4.7 GHz)

Table 1 Results of dissolved gas analysis, relative dielectric constant and velocity of electromagnetic wave on used insulation oil (3dB bandwidth: 4.75 GHz)

		사용유 1	사용유 2	사용유 3	사용유 4
가 스 분 석 결 과 (ppm)	H ₂	7	23	1	21
	O ₂	25,410	20,915	8,112	13,335
	N ₂	72,764	57,802	25,902	87,914
	CH ₄	183	110	8	4
	CO	361	327	358	190
	CO ₂	3,161	2,145	1,961	2,508
	C ₂ H ₄	121	120	2	1
	C ₂ H ₆	41	33	1	2
	C ₂ H ₂	1	1	0	0
C ₃ H ₈	58	48	3	2	
t_{oil} (ns)		2.98	2.96	2.98	2.98
비유전율, $\epsilon_{r,oil}$		2.22	2.16	2.22	2.22
전파속도, v_{oil} (108 m/s)		2.01	2.04	2.01	2.01

표 1의 유증가스분석결과와 비유전율은 특별한 상관관계가 없어보였으며, 선행연구에서 측정된 신유의 비유전율 2.11과 비교해볼 때 사용유의 유전율은 약간 증가함을 알 수

있었다[5]. 따라서 TOA법으로 전력용 변압기의 부분방전이 발생한 결함위치를 추정할 때 절연유를 채취하여 정확한 유전율 및 전파속도를 측정해야 하며, 만약 절연유 채취가 불가능 할 때 절연유의 비유전율을 신유와 상기한 사용유의 비유전율의 결과를 고려한다면 2.21 ± 0.10 로 가정함이 타당하다.

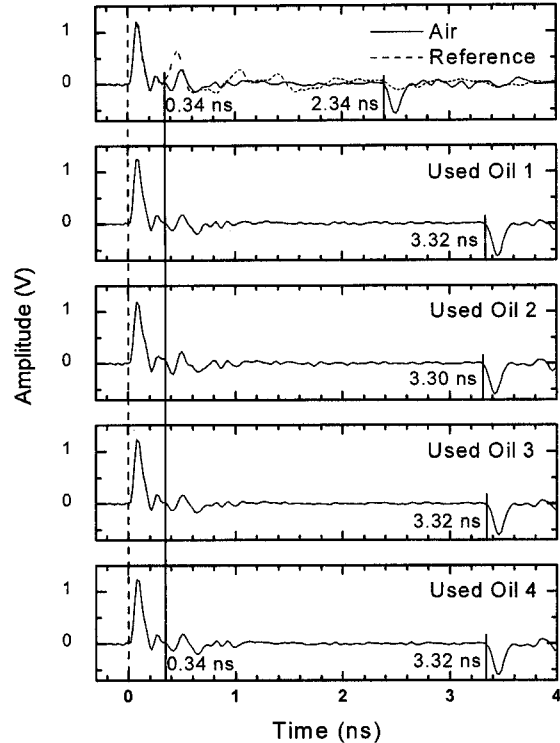


그림 3 오실로스코프에서 측정된 펄스의 파형. 실선: 공기 또는 절연유로 충전된 동축챔버를 연결했을 때 측정된 파형, 점선: 동축챔버를 제거후 측정된 파형.

Fig. 3 Waveform of pulse shape detected by oscilloscope. Solid line: waveform in case of coaxial chamber filled with air or used insulation oil, dash line: waveform without coaxial chamber.

4. 결론

TDR 기법을 사용하여 DC에서 4.2 GHz 까지의 주파수 대역에서 전력용 변압기에 사용된 4가지 절연유에 대한 유전율 및 전파속도를 측정하였다. 측정된 유전율 및 전파속도는 각각 2.21 ± 0.03 및 $(2.03 \pm 0.01) \times 10^8$ m/s로 신유의 유전율 및 전파속도와 약간 다른 값을 가졌다. 따라서 TOA법으로 부분방전이 발생한 결함위치를 정밀하게 추정코자 한다면 해당 변압기의 절연유를 채취하여 유전율 또는 전자기파의 전파속도를 측정하는 것이 필요하다.

본 논문에서 사용한 동축챔버는 소량(약 130 cc)의 절연유로도 유전율과 전파속도를 정확히 측정할 수 있으므로 변전소와 같은 현장에서 방전발생위치 추정에 유용하게 사용할 수 있을 것으로 전망한다.

참 고 문 헌

- [1] 구선근 등. "UHF 부분방전 상시감시시스템 실변전소 실증시험" 제 37회 대한전기학회 하계학술대회 초록집, APP-3, 용평, 2006.
- [2] B. F. Hampton & R. J. Meat, "Diagnostic Measurements at UHF in Gas Insulated Substations", IEE Proc.. Vol. 135, No.2, p141, 1988.
- [3] M. D. Judd, B. M. Pryor, S. C. Kelly & B. F. Hampton, "Transformer Monitoring Using the UHF Technique", Proc. of ISH, Paper 5.362.P5, London, 1999.
- [4] K. Raja, F. Devauz & S. Lelaidier, "Recognition of Discharge Sources Using UHF PD Signatures", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 18, No. 5, pp8-14, 2002.
- [5] 구선근, 주형준, 박기준, 한기선, 윤진열, "TDR을 이용한 극초단파 대역에서 절연유 유전을 측정", 2008년 대한전기학회 전기물성응용부분회 합동 춘계학술대회 논문집, pp173-174, 대전, 2008.
- [6] A. Cataldo, L. Tarricone, M. Vallone, F. Attividdimo & A. Trotta, "Uncertainly Estimation in Simultaneous Measurements of Levels and Permittivities of Liquid Using TDR Technique", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 57, No. 3, pp 454-466, 2008.
- [7] Edgar Hund, "Microwave Communication", p 110, McGraw-hill Book Company, 1982.

저 자 소 개



구 선 근 (具 嬋 根)

1967년 10월 16일생. 1990년 연세대학교 물리학과 1992년 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 1995년 한국전력공사 입사. 2001년~현재 한전 전력연구원 전력계통연구소 선임연구원
 Tel : 042-865-5866
 Fax : 042-865-5804
 E-mail : freeon@kepri.re.kr



주 형 준 (朱 炯 俊)

1972년 2월 20일생. 1996년 충남대 전기공학과 졸업, 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2006~현재 한전전력연구원 전력계통연구소 연구원
 Tel : 042-865-5861
 Fax : 042-865-5804
 E-mail : juhjun@kepri.re.kr



박 기 준 (朴 基 濬)

1991년 인하대 공대 응용물리학과 졸업. 1993년 Univ. of Central Florida 전기전자공학과 졸업(석사). 1997년 Univ. of Central Florida 전기전자공학과 졸업(공학박). 1996 - 현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구소 선임연구원.
 Tel : 042-865-5864
 Fax : 042-865-5844
 E-mail : killer@kepri.re.kr



한 기 선 (韓 基 善)

1966년 06월 20일생. 1991년 한양대학교 전기학과 졸업. 2007년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 한국전력공사 입사, 2005년~현재 한전 전력연구원 전력계통연구소 선임연구원
 Tel : 042-865-5865
 Fax : 042-865-5804
 E-mail : hankison@kepc.co.kr



윤 진 열 (尹 珍 烈)

1956년 03월 12일생. 1982년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사) 1977년 한국전력공사 입사, 2003년~현재 한전전력연구원 책임연구원
 Tel : 042-865-5250
 Fax : 042-865-5860
 E-mail : jyyoon@kepri.re.kr