

AC 브리지 회로에 의한 주상 변압기의 감시 기법

°윤용한* · 민경래* · 최도혁** · 김재철***
 *(주)테크빌 · **한국건설기술연구원 · ***송실대학교 전기공학과

A Monitoring Technique of Pole Transformers using AC Bridge Circuit

°Yong-Han Yoon* · Kyeoung-Rae Min* · Do-Hyuk Choi** · Jae-Chul Kim***
 *Techvill Co., Ltd. · **KICT · ***Dept. of Electrical Eng., Soongsil University

Abstract - This paper presents a monitoring technique of pole transformers using AC bridge circuit. And to detect the capacitance in oil more effectively, this paper used AC bridge circuit. The sensor in oil which could be placed inside of the distribution transformer can measure the changes of capacitance in oil. And with the sensing of the upper part's capacitance, it is possible to determine the changes of the oil height. Establishment of the proposed system helps to build the confidence in monitoring of the pole transformers.

1. 서론

주상 변압기 사고의 대부분은 외부에서 유입된 사고 영향 및 경년 열화에 의해서 발생되며, 절연 열화는 과부하에 따른 과열, 흡습 등이 원인으로 작용한다[1-3]. 절연유의 유전정점 측정법은 절연유 분자의 유전 분극에 기인한 쌍극자 손실과 이온이나 하전 미립자의 진동에 따르는 도전 손실에 의해 정해지지만, 일반적으로 절연유일 경우에는 도전 손실이 주요 원인이 된다. 따라서 유전정점은 수분 기타 오염 물질의 함유량 또는, 절연유 자체의 열화 정도와 관계되는 중요한 성질이다[2]. 그러나 가장 중요한 것은 현재 설치 대수가 130여만 대에 이르고, 지역적으로 광범위하게 분포된 배전용 주상 변압기에는 현실적·경제적으로 적용하기 곤란하다.

본 논문에서는 센서를 이용하여 변압기유의 레벨을 인지하기 위하여 센서 내부의 공기와 절연유의 비율 변화(유전율 변화)에 따른 정전 용량 변화량을 측정하였다. 정전 용량을 측정하기 위하여 잡음의 영향을 최소화한 변형된 AC 브리지 회로를 이용하여 유위 측정 장치를 개발하였다. 개발한 장치와 HP사의 임피던스 분석기의 정전 용량을 비교, 실험한 결과 상당히 일치함을 알 수 있었다. 또한, 변압기유 온도를 변화시키면서 두 장치간의 측정값을 비교 검토하였으며, 온도 변화에 따른 오차를 줄이기 위해서는 적절한 온도 보상이 필요함을 알 수 있었다.

2. 유위 측정을 위한 정전 용량 측정 회로

본 논문에서 제안한 유위 측정을 위한 정전 용량 측정 회로는 내부 센서와 연결되어 있어 주상 변압기 절연유의 유위를 측정하는데 사용한다.

2.1 AC 브리지 회로

브리지 회로는 일반적으로 저항, 인덕턴스, 정전 용량 등의 측정에 이용한다. AC 브리지 회로는 DC 브리지 회로와 마찬가지로 브리지 회로가 평형을 이룰 때 브리지 회로 소자의 임피던스 값을 결정하는 계측기이며, 그 구조는 휘스톤 브리지를 기초로 하고 있다[4]. AC 브리지 회로는 각 변의 임피던스 구성에 따라 여러 종류가

있으며 용도 또한 다양하다. 특히, 미지의 임피던스 값을 측정함에 있어서 표준변의 위상각을 미지의 임피던스 위상각과 같도록 조절하는 방식을 비교 브리지라 부른다. 그림 1은 정전 용량 측정을 위한 브리지 회로이다 [4].

일반적으로, 커패시터에 AC 전압을 인가하면 순수한 충전 전류와 함께 유전체 손실 전류가 흐른다. 이 때문에 커패시터를 등가 직렬 정전 용량 C_x 와 등가 직렬 저항 R_x 가 연결된 등가 회로로 나타낼 수 있다. 따라서, 미지의 정전 용량을 측정하려면 무손실의 표준 정전 용량 C_s 와 가변의 표준 저항 R_s 로 구성된 회로를 측정하려는 커패시터와 비교하면 된다. 즉, AC 브리지 회로를 이용한 정전 용량 측정은 4개의 브리지 구성 요소가 평형을 이루었을 때의 각 변의 값을 측정값으로 결정하는 방법이다. 그러나 이 방법은 매우 예민한 측정은 가능하나 측정시간이 길고, 반복적인 작업을 필요로 한다.

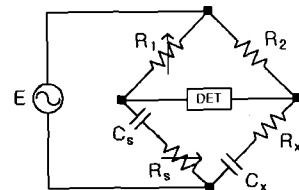


그림 1. 정전 용량 측정 브리지 회로

네 변을 구성하는 요소들의 평형 방정식을 유도한 후, 측정하고자 하는 값을 정리하면 다음과 같다.

$$R_x = R_s \frac{R_2}{R_1} \quad (1)$$

$$C_x = C_s \frac{R_1}{R_2} \quad (2)$$

일반적으로, 정전 용량 측정에서 R_x 성분은 매우 적으나, 이 값을 R_s 에 의해 상쇄시켜야만 완전한 평형을 이룰 수 있다. 브리지 방식의 측정은 식에서 알 수 있듯이 주파수 항목이 없으므로 정전 용량과 주파수는 상관성이 없다. 그러나 임피던스의 경우는 주파수에 반비례하므로 측정 주파수의 안정이 필요하다. 위의 브리지 회로는 여자 전압을 공급하는 변과 검출부를 각각 분리해야 하며 브리지 회로 구성 요소가 분포 용량에 대해서도 평형을 갖도록 설계해야 하므로 실제 구성에 있어서 어려움이 있다.

2.2 제안된 유위 측정 회로

본 논문에 적용한 정전 용량 측정 장치는 분포 용량에 의한 영향을 제거하고, 미세 신호를 점지점 기준으로 측정할 수 있게 하였다. 즉, 브리지 회로가 평형을 이루었

을 때 높은 임피던스가 됨으로써 발생하는 잡음에 대한 영향을 최소화한 변형된 브리지 회로 구조[5]로 설계하였다. 그림 2는 개발한 유위 측정 회로이다.

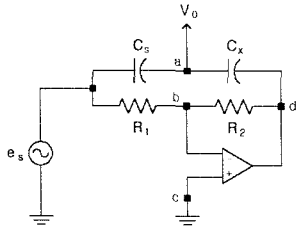


그림 2. 개발된 유위 측정 회로

개발된 유위 측정 회로는 인가 전압을 연산 증폭기를 사용하여 반전 증폭함으로써 \$C_x\$에 인가되는 전압이 2배로 상승되는 효과가 있다. 평형 전압 측정점인 b 부분의 연산 증폭기의 가상 접지에 의해 접지되므로 a 지점과 접지에서 측정 신호를 받을 수 있고, 높은 임피던스를 가진 출력점이라도 높은 신호 대 잡음비를 유지할 수 있다. 또한, 연산 증폭기의 출력 임피던스가 매우 낮으므로 이점에 측정 프로브의 외피를 연결함으로써 노출된 상태의 단자에 인가되는 각종 잡음 성분을 유효하게 차단할 수 있는 장점이 있다. 그림 2의 회로에서 \$C_s\$는 기준 용량으로서 측정 대상값의 범위를 결정할 수 있으며, \$C_s\$를 조절함으로써 초기의 평형값을 조절할 수 있다. \$C_x\$가 변화를 일으키면 변화량이 a 점에 나타나므로 다음 단에 연결된 증폭 회로에서 측정할 수 있다. 설계된 회로의 정전 용량을 유도하면 다음 식 (3)과 같다.

$$C_x = \frac{1-K}{K} \cdot C_s \quad (3)$$

$$K = \frac{V_o}{2e_s} + 0.5 \quad (4)$$

2.3 유위 측정을 위한 정전 용량 측정 실험

주상 변압기 유위 측정을 위한 정전 용량 측정에서는 개발한 유위 측정 장치와 정밀급 측정 장치인 임피던스 분석기의 비교, 실험 분석을 하였다. 유위 측정을 위한 정전 용량 측정 실험은 ① 측정 정확도를 높이기 위하여 측정용 주파수 선정 실험과 ② 개발한 유위 측정 장치와 정밀급 임피던스 분석기와 비교 실험을 통한 장비의 효용성 입증과 ③ 유위 감소와 정전 용량 변화량을 통한 유위 측정 비교 실험에 주안점을 두고 실험을 수행하였다.

유위 측정을 위한 정전 용량 측정 실험에서는 임피던스 분석기를 이용하여 정밀급 측정에 이용되는 HP 셀과 열화 측정 센서간의 유중 온도 변화에 따른 정전 용량의 경향 분석 실험을 실시하였다. 정전 용량 측정 실험에 사용된 시료는 표 1과 같이 10년 이상 경년된 주상 변압기에서 추출하였다. 시료 1번의 경우는 경년으로 철거된 것에 비해 시료 2번은 과부하의 영향을 받아 철거되었다는 차이점이 있다.

표 1. 정전 용량 측정에 사용된 경년유

시료 번호	변압기 용량	제조 년·월	관리 이력
1	10(kVA)	1986.8	과부하
2	10(kVA)	1986.1	노후 철거

그림 3과 그림 4는 표 1의 시료에 대해서 임피던스 분석기와 HP 셀을 이용하여 유중 온도 변화에 따른 주파수별 정전 용량의 변화를 측정된 결과이다. 60[Hz]에서 측정값 변화가 불규칙하게 나타났으며, 1[kHz]에

서는 변화가 비교적 일정하였다. 이러한 결과를 토대로 열화 측정 센서를 통한 유위 측정 회로의 주파수는 1[kHz]로 결정하였다. 또한, 시료 1번에서의 정전 용량이 시료 2번에서의 정전 용량보다 측정 온도 영역 내에서 더욱 크게 나타났다. 이것은 사용 년 수에 의한 영향보다는 두 시료의 관리 이력 때문이라고 생각된다.

그림 5에서는 임피던스 분석기와 센서를 이용하여 측정된 유온에 따른 정전 용량 변화를 나타낸 그래프다. 사용 주파수는 1[kHz]이며, 시료별 정전 용량의 변화 경향은 HP 셀의 측정값과 유사한 선형성을 갖고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 과부하의 영향을 가진 시료 1번이 시료 2번에 비하여 더 높은 정전 용량을 가지고 있음을 알 수 있다. 그림 6은 센서와 유위 측정 장치를 이용하여 유온에 따른 정전 용량의 변화를 나타낸 그래프다. 임피던스 분석기에 의한 측정과 마찬가지로 시료 1번이 시료 2번에 비하여 더 높은 정전 용량을 가지고 있음을 알 수 있다.

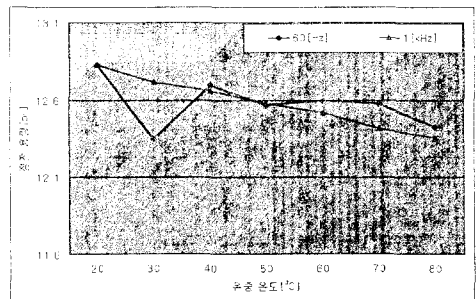


그림 3. 임피던스 분석기와 HP 셀을 이용한 유온에 따른 정전 용량 변화(시료 1번)

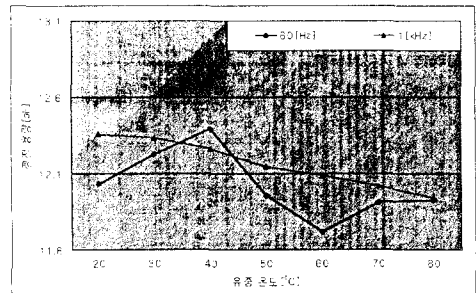


그림 4. 유온에 따른 정전 용량 변화(시료 2번)

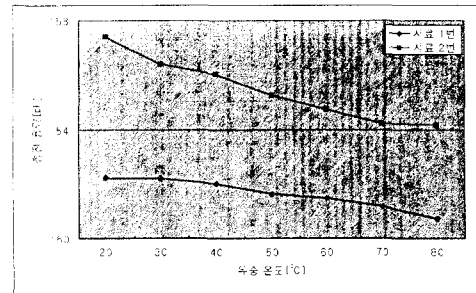


그림 5. 임피던스 분석기를 이용한 유온에 따른 정전 용량 측정

임피던스 분석기와 개발된 유위 측정 장치간의 실험 결과를 비교한 것은 표 2와 같다. 표 2로부터 유위 측정 장치의 측정값과 임피던스 분석기 측정값의 비교를 통해 소숫점 2자리수 이상에서 오차를 가지고 있으며,

이는 온도에 대한 정전 용량 변화량 측정에 있어서 본 논문에서 제안한 장치와 기존 정밀 계측 장치와의 결과가 매우 유사함을 알 수 있다.

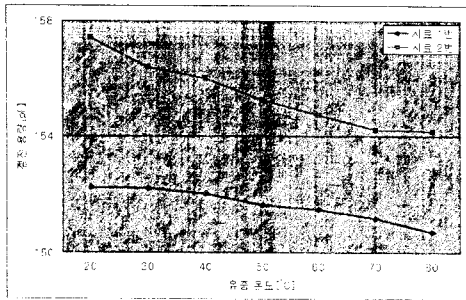


그림 6. 유위 측정 장치를 이용한 유온에 따른 정전 용량 측정

표 2. 임피던스 분석기와 유위 측정 장치의 비교

시료 번호	임피던스 분석기		유위 측정 장치	
	최고값 [pF]	변화량 [pF/°C]	최고값 [pF]	변화량 [pF/°C]
1	157.373	0.054	157.395	0.054
2	152.227	0.025	152.246	0.026

그림 7은 센서 내에 있는 배전용 주상 변압기 유위 변화에 따른 정전 용량 변화량을 나타내고 있으며, 시뮬레이션 결과와도 유사하게 나타남으로써 유위 측정 장치의 적용성을 검증하였다. 즉, 절연유가 사용 및 상태 변화에 따라 누유됨을 모의 실험하였다. 본 실험에서는 초기 유위에 대한 정전 용량을 0으로 하였으며, 각 측정값은 평균된 결과이다. 열화 측정 센서 내부의 정전 용량은 절연유의 비유전율에 영향을 받으며, 결국 유위와 직접적인 관계가 있다. 이상의 실험 결과를 보면 배전용 주상 변압기에서 유위 및 절연유의 상태를 정전 용량 측정에 의하여 감시할 수 있음을 알 수 있다. 그림 7에서 유위 변화(ΔL)에 따라 시뮬레이션 결과와 유위 측정 장치와의 오차가 70[mm]부터 커지는 것은 장비의 비선형성 문제이므로 보상식을 이용하면 오차를 줄일 수 있으리라 기대된다.

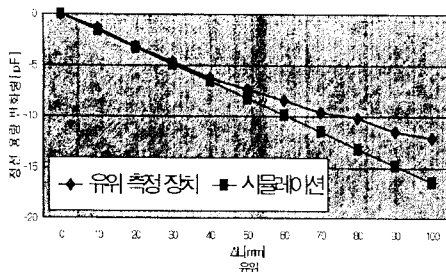


그림 7. 유위 감소에 따른 정전 용량 변화량

ΔL 은 유위의 변화를 의미하며, 그 변화는 다음과 같다.

$$\Delta L = L - l \quad (5)$$

여기서, L [mm] : 열화 측정 센서 상부의 높이,
 l [mm] : 열화 측정 센서 상부 내의 유위

그러나 유위 측정시 정확도를 높이기 위해서는 적은

값이지만 유온 증가에 따라 정전 용량이 줄어들기 때문에 그림 5와 그림 6과 같이 이 값을 보상해야만 정확한 주상 변압기의 유위를 측정할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 열화 측정 센서를 이용하여 변압기유의 레벨을 인지하기 위하여 센서 내부의 공기와 절연유의 비율 변화(유전율 변화)에 따른 센서의 정전 용량의 변화량을 측정하였다. 본 논문에서는 이 정전 용량을 측정하기 위하여 잡음의 영향을 최소화한 변형된 AC 브리지 회로를 이용하여 유위 측정 장치를 개발하였다. 개발한 장치와 DIP사의 임피던스 분석기의 정전 용량을 비교 실험한 결과 상당히 일치함을 알 수 있었다. 또한, 변압기 유 온도를 변화시키면서 두 장치간의 측정값을 비교 검토하였으며, 온도 변화에 따른 오차를 줄이기 위해서는 적절한 온도 보상이 필요하다.

따라서, 본 연구에서 개발한 AC 브리지를 이용한 주상 변압기 감시 및 진단 장치의 효용성을 입증하기 위해서 기존 계측 장치의 분석 결과와 비교하였고, 그 상관 관계를 연구한 결과 상대적인 선형 관계가 있음을 확인하여 타당성이 있는 장치임을 검증하였다.

(참고 문헌)

- [1] Y. H. Yoon et. al., "Development of A Deterioration Diagnosis Device for Pole Transformer Using signal Processing and wireless communication," *IEEE Power Engineering Society 2000 Summer Meeting at Seattle, Washington, USA.*, Submitted, July 16-20 2000
- [2] 電気學會, 電氣設備の診斷技術, オム社, pp. 84-89, 1988.
- [3] 月岡 淑郎, "油入變壓器の外部診斷技術," *オム誌*, 四月號, pp. 40-44, April 1987.
- [4] 고대식, 전자용회로집, 도서산업사, pp. 174-210, 1991.
- [5] 정혜선, 노이즈 방지와 대책, 성안당, pp. 57-64, 1991.