



# 변압기의 절연진단 기술

박 회 로

(송실대학교 공과대학 전기공학과 교수)

## 1. 서 론

최근의 전력설비는 전력수요의 증가와 더불어 계통이 확대됨에 따라 구성기기가 대용량화, 초고압화되고 있으며 변전소는 무인화되는 추세이다. 국내에서도 경제규모 확대와 생활수준의 향상으로 국내 기존 송전전력의 증가가 불가피한 실정이며, 수요지 근처의 전원입지 및 송전선로의 경과지 확보난 등으로 선로당 송전용량을 증가시켜야 할 상황에 있다. 대용량 전력설비의 사고는 그 파급효과가 광범위하게 수용가에 미치며 복구에 장시간이 소요된다. 그러나 전력기기의 밀폐화, 복합화, 축소화는 내부의 점검을 곤란하게 하고 전력설비의 신뢰성은 전력공급의 안정화와 신뢰성면에서 매우 중요한 사항이다. 특히 대용량 전력용 변압기는 전력의 안정공급에 관련된 매우 중요한 설비로써 그 기능이나 성능을 충분히 확보하여야 하므로 사고를 예방하기 위한 보수관리 및 절연진단의 필요성이 증가하고 있다.

지금까지 변압기의 유지보수는 일상순시와 전력설비를 일정기간 사용함에 따른 정기점검에 의하여 불량개소를 발견하고 보수하는 일정주기에 따른 예방보수를 하였으나, 경제적인 유지와 신뢰성있는 전력공급을 위하여 변압기의 상태를 점검하여 정비하는 상태점검으로 전환하고 있다. 따라서 최근에는 변압기의 이상징후를 운전상태(on-line)에서 상시 감시하여 장애에 일어날 사태 등을 예측하고 그것이 치명적이기 이전에 처리하는 예측보전기술 중심으로 변하고 있다.

변압기의 내부이상을 진단하는 방법으로는 부분방전법, 절연유의 특성시험 및 가스분석법, 역률측정법, 저압서어지 시험법 등이 있으나, 진단방법의 특성 및 신뢰성을 고려할 때, 어느 한 방법으로는 불충분하므로 각종 진단 결과의 종합분석이 필요하다.

## 2. 유입 변압기의 이상과 점검기술

### 2.1 변압기의 이상

#### 2.1.1 변압기의 내부이상

변압기는 주요 부품들이 기기내부에 내장되어 조립되므로

운전시 고장 징후의 발견이 곤란하다. 그러나 변압기 내부이상은 중대사고로 발전할 가능성이 있으므로 사고의 미연방지가 중요하다. 변압기 내부에서의 주요 이상은 다음과 같다.

#### (1) 철심 및 철심 주위 구조체에 관한 이상

철심 및 철심 주위 구조체에 관한 이상으로는 철심 및 철심 주위 구조체의 과열 및 철심의 진동증가가 있다. 이러한 과열의 원인은 냉각불량, 누설자속, 조임불량 등이다.

#### (2) 코일, 리드 및 절연물에 관한 이상

코일에 관한 이상으로는 냉각불량에 의한 과열, 절연불량 및 이상전압에 의한 방전, 단락 전자력에 의한 코일 도체의 변위 등이다. 코일에 관한 이상은 치명적인 경우가 많으므로 가능한 한 조기에 이상을 검출하는 것이 중대사고의 미연방지에 중요하다. 리드에 관한 이상으로는 냉각불량, 접속부의 접속불량에 의한 과열 및 절연불량에 의한 방전이 있다. 절연물에 관한 이상으로는 과열에 의한 열화, 경년열화에 의한 절연내력 및 기계적 강도의 저하, 이물의 혼입에 의한 부분방전이 있다.

### 2.1.2 변압기의 외부이상

변압기 외부이상의 발생개소로는 탱크, 배관의 용접불량, 손상 등에 의한 누유, 패킹불량 또는 경년열화에 의한 누유가 있다. 누유는 유면계 및 목시점검에 의하여, 그 외 파손 등은 목시점검에 의하여 검출이 가능하다.

### 2.1.3 부속기기의 이상

변압기 부속기기의 이상으로는 냉각장치, 각종계기, 각종 보호장치 및 부하시 탭 절환장치의 이상이 있다.

냉각장치의 이상에는 용접불량, 손상, 부식 등에 의한 누유 및 팬, 펌프모터의 고장에 의한 냉각능력의 저하가 있다. 누유에 있어서는 유면계 또는 목시점검으로, 냉각능력의 저하에 있어서는 유온계로 각각 판단이 가능하다.

각종 계기 및 보호장치의 이상으로는 오동작, 부동작, 지시불량 등이 있다. 그 원인으로는 흡습 등에 의한 접점의 성능저하, 압착불량에 의한 단선, 단락 또는 지락 등의 전기회로적 이상 및 동작부의 기계적 이상이 고려된다.

부하시 탭 절환장치에 관한 이상으로는 이상차단, 부동작,

오동작 등이 있으며, 그 원인으로는 조작기구의 전기적, 기계적 불량이다.

## 2.2 이상의 검출

변압기의 이상검출 수단은 인간의 오감에 의한 점검에서 측정기를 사용한 예방진단까지 각종 방법이 있다.

### 2.2.1 순시점검

순시점검은 변압기의 운전상태에서 주로 육안에 의한 관찰로 점검하는 것으로 온도, 음향변화, 냄새, 진동, 변색, 파손, 접속부의 과열 등을 확인함과 동시에 전압, 전류, 역률 등을 체크하여 운전상태를 관리한다.

### 2.2.2 보통점검

변압기의 이상을 검출하기 위해서는 순시점검에 더하여 정기적으로 운전을 정지하고 순시점검에서 측정할 수 없었던 항목에 대하여 측정, 시험을 한다. 보통점검은 설비의 기능확인 및 기능유지를 목적으로 하는 점검으로서 기기의 내부보다는 주로 기기의 외부에서 행하는 점검이다.

### 2.2.3 정밀점검

변압기를 정상상태로 유지하기 위하여 순시점검과 보통점검을 하지만, 설비의 성능회복을 목적으로 내부상태를 진단하는 정밀점검을 한다.

#### (1) 유중가스분석

유입변압기의 내부이상현상은 주로 절연파괴와 국부과열에 의한 발열을 동반한다. 이러한 발열원에 접하는 절연유, 절연지, 프레스보드 등의 절연물은 분해반응하여 탄화수소계 가스를 발생한다. 이 발생가스의 대부분은 절연유 중에 용해되므로 변압기에서 절연유를 채유하여 유중의 가스를 분석하고, 그 가스량 및 가스조성비에 의해 변압기의 내부이상의 유무, 이상의 종류를 추정한다.

#### (2) 부분방전 측정

변압기의 절연파괴사고는 그 전구현상으로 부분방전을 동반하는 일이 많다. 따라서 부분방전을 검출함으로써 절연파괴를 미연에 방지할 수 있다. 변압기 내부에서 부분방전이 발생하면 펄스전류와 그것에 동반된 음파가 발생한다. 따라서 부분방전 검출에는 펄스전류를 검출하는 방법과 절연유중을 전달한 음파(일반적으로 초음파)를 검출하는 방법이 있다. 또한 이것을 조합하여 노이즈의 제거와 부분방전의 위치추정도 가능하다.

#### (3) 절연저항 측정

절연저항 측정은 절연물의 흡습과 열화(체적저항율의 저하) 등을 추정할 수 있다. 절연저항 시험은 일반적으로 1,000V 이상의 절연저항계를 사용하여 권선상호간 및 권선과 대지간의 절연저항을 측정한다. 그 허용치는 그림 1과 같다.

#### (4) 유전정점(tan δ) 측정

유전정점은 절연물의 수분량 변화에 민감하므로 흡습의 판

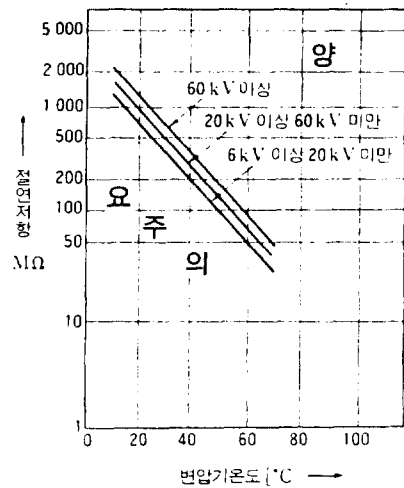


그림 1. 변압기의 절연저항의 판정

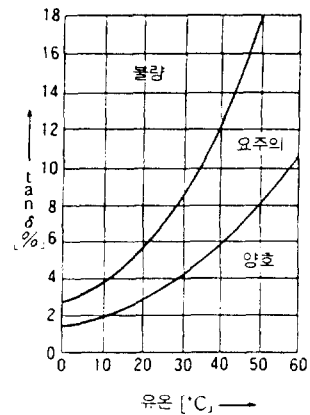


그림 2. 변압기의 tan δ에 의한 열화판정 기준

정과 절연물의 열화정도 판정에 유효하다. 측정값의 절대치와 측정치의 경년변화에서 열화의 진단이 가능하다. 시험은 일반적으로 휴대용 tan δ 계 및 웨링브릿지를 사용하여 권선상호간 및 권선과 대지간의 tan δ를 측정한다. tan δ에 의한 변압기의 절연열화 판정의 기준치는 그림 2와 같다.

#### (5) 절연유의 특성측정

절연유의 양부는 유입 변압기에 있어서 매우 중요한 요소로서 냉각효과 및 수명에 영향을 미친다. 절연유가 열화하면 절연파괴전압, 전산가, 체적저항율, 수분량 등이 변화하므로 이것을 측정함으로써 절연유의 양부를 판정할 수 있다.

## 3. 유중가스분석

변압기는 절연능력과 냉각능력을 확보하여야 하므로 보통 절연유와 유침지의 복합절연이 채용되고 있다. 따라서 변압기

권선은 일반적으로 유침지로 둘러 싸여 있으므로 부분방전이 발생하여도 바로 절연파괴에 도달하지 않고 부분방전이 다수 발생함에 따른 생성가스가 발생한 후 절연파괴로 이어진다. 유중 가스분석은 절연유 중에 용해되어 있는 가스를 분석하여 변압기 내부의 이상유무 및 이상의 종류를 진단하는 방법으로 1960년대에 적극적인 연구가 추진되어 1970년대에 실용화되어 현재 세계적으로 널리 이용되고 있는 진단기술이다.

### 3.1 유중용해 가스량과 절연유 채취

#### 3.1.1 유중용해 가스량

유입 변압기의 내부에 접촉불량, 국부과열, 부분방전 또는 아아크에 의해 이상이 발생하면 절연유 또는 고체 절연물이 열분해하여 가스가 발생하여 절연유 중에 용해된다. 절연유 중에 용해되는 가스량은 가스의 압력(Henry의 법칙)에 비례하고 분산계수에도 비례한다.

#### 3.1.2 가스의 유중 용해, 확산

절연유에 용해되어 있는 가스량은 유면상의 가스압과 평형을 유지하며 그 평형조건은 다음과 같다.

$$P = P_0 \frac{VL}{k}$$

여기서, P(kgf/cm<sup>2</sup>)는 유면상의 가스 분압, P<sub>0</sub>(kgf/cm<sup>2</sup>)는 대기압, VL(ml/ml)은 절연유 1ml중의 용해가스량(표준상태, ml), k(ml/ml)는 분산계수이다.

$$P > P_0 \frac{VL}{k}$$

일 경우, 가스는 유중에 평형될 때까지 용해하고

$$P < P_0 \frac{VL}{k}$$

일 경우, 가스는 유중에서 기중으로 확산된다.

#### 3.1.3 절연유의 채취

일반적으로 가스분석용 절연유는 변압기의 하부에 설치된 배유변에서 채취하고 있다. 내부과열 등에 의해 발생한 가스는 절연유에 대한 용해도가 큰 것이 대부분이기 때문에 거의가 유중에 용해하며, 유중 용존가스는 운전중의 절연유가 강제 또는 자연순환에 따라 일정시간 후에는 균일하게 확산되는 것으로 알려져 있다. 그러나 사고발생직후 또는 운전정지중에는 유중가스의 확산이 완전하지 않기 때문에 채유장소 및 채유시간에 특별한 주의가 요구된다.

### 3.2 절연유의 분석방법

추출된 가스는 혼합가스이므로 이것을 화학분석장치를 이용하여 정량분석한다. 분석장치로는 가스크로마토그래피가 많

이 사용된다. 일반적으로 분석대상가스는 O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub><sup>\*</sup>, CH<sub>4</sub><sup>\*</sup>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub><sup>\*</sup>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub><sup>\*</sup>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub><sup>\*</sup>, CO<sup>\*</sup>, CO<sub>2</sub> 등 9종류의 가스이다.(여기서 \*는 가연성 가스이다.)

일반적으로 가스분석에 의한 변압기 내부의 이상진단은 특정가스나 가연성가스의 총량에 따라 결정된다. 현재 한국전력에서 적용하고 있는 판정기준 및 분석주기는 표 1과 같다.

표 1. 판정기준 및 분석주기 (단위 : ppm)

구분	정상	요주의	이상	위험
H <sub>2</sub>	400 이하	400 이상	800 이상	-
CO	300 이하	300 이상	800 이상	-
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	20 이하	20 이상	100 이상	-
CH <sub>4</sub>	250 이하	250 이상	750 이상	-
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	250 이하	250 이상	750 이상	-
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	250 이하	250 이상	750 이상	-
CO <sub>2</sub>	4000 이하	4000 이상	7000 이상	-
TCG	700 이하	700 이상	1800 이상	-
경시증가량	-	250이상/년	100이상/월	300이상/월
분석주기	1회/년	추적조사 1회/3~6월	추적조사 1회/1~2월	내부점검

유중가스 검출결과에 대한 상태진단은 농도와 증가량에 의한 진단으로 구분할 수가 있는데, 농도에 의한 수소가스의 상태진단기준은 표 2와 같이 3가지 경우로 구분되며, 탄화수소가스의 총량농도의 경우도 총 가연성가스(TCG) 기준치에서 CO가스의 요주의 또는 이상기준치를 뺀 값으로 구분하여 상태진단의 기준을 설정하고 있다.

표 2. 농도에 의한 상태진단 기준 (단위 : ppm)

구분	조치사항	
	H <sub>2</sub>	HC
H <sub>2</sub> ≤ 400	HC ≤ 400	없음
	400 < HC ≤ 1300	추적조사
	HC > 1300	정밀조사
400 < H <sub>2</sub> ≤ 800	HC ≤ 400	추적조사
	400 < HC ≤ 1300	추적조사
	HC > 1300	정밀조사
H <sub>2</sub> > 800	HC ≤ 1300	정밀조사
	HC > 1300	정밀조사

수소가스의 월증가량에 의한 상태진단 기준은 표 3과 같이 4단계로 구분하며, 탄화수소가스의 경우는 탄화수소가스 총량의 증가량에 의한 기준을 4단계로 구분하여 설정하고 있다.

표 3. 증가량에 의한 상태진단 기준 (단위 : ppm)

구분	H <sub>2</sub>	HC	조치사항
월증가량	H <sub>2</sub> ≤ 20	HC ≤ 30	없음
	20 < H <sub>2</sub> ≤ 50	30 < HC ≤ 100	추적조사
	50 < H <sub>2</sub> ≤ 100	100 < HC ≤ 300	추적조사
	H <sub>2</sub> > 100	HC > 300	정밀조사

### 3.3 상태진단의 절차

유중가스의 검출결과에 대한 상태진단은 먼저 농도에 의한

진단을 실시하고, 다음으로 증가량에 따른 진단을 실시한다.

### 3.3.1 농도에 의한 상태진단

상태진단할 변압기에 대하여 수소와 탄화수소 가스의 총량 농도가 모두 400ppm 이하이면 정상변압기로 취급하며, 수소 가스의 농도가 800ppm 이상이거나 탄화수소가스의 농도가 1,300 ppm 이상이 되면 정밀조사를, 그 이외의 농도일 경우는 추적조사를 실시한다.

### 3.3.2 증가량에 의한 상태진단

수소가스와 탄화수소가스의 총량농도가 모두 400ppm 이하일 경우 월증가량이 각각 20ppm, 30ppm 이하이면 정상변압기로 취급하며, 수소가스의 월증가량이 100ppm 이상이거나 탄화수소가스의 월증가량이 300ppm 이상이면 정밀조사를, 그 이외의 경우는 추적조사를 실시한다. 또한 수소와 탄화수소가스의 총량농도가 각각 400ppm 이상일 경우 월증가량이 각각 100ppm 이상이면 정밀조사를, 그 이외의 경우에는 추적조사를 한다.

## 3.4 유증가스분석에 의한 상태진단에 영향을 미치는 제인자

### 3.4.1 Stainless강 등에 의한 수소가스의 발생

변압기 설치 후 운전초기에 수소가스를 주성분으로 하는 가연성 가스가 증가하는 경우가 있다. 이의 주원인은 stainless강의 촉매작용에 의한 절연유의 탈수소반응에 기인하는 것과 stainless강에 흡착되어 있는 수소가스가 절연유로 방출하는 경우 등이 있다.

### 3.4.2 고장수리 후의 가연성가스 증가

변압기 내부 고장수리 후는 보통 탈기주유하는 것이 일반적이거나 내부점검을 위해 변압기를 해체하는 기간이나 수리 후의 탈기주유 정도에 따라 유중에 가연성가스가 일시적으로 증가하는 경우가 있다. 일반적으로 가연성 가스량의 잔존율은 10~30%, 가연성 가스량이 거의 일정하게 되기까지 필요한 기간은 2~12개월 정도이다. 또한 아세틸렌과 같은 가스는 수리 후에 탈기하여도 잘 제거되지 않기 때문에 40% 정도의 잔존율을 나타내기도 한다.

### 3.4.3 절연지의 가스흡착

변압기에는 절연지가 다량 사용되고 있고 유증가스는 절연지에 흡착되어 온도에 따라 평형관계를 유지하고 있다. 운전 중인 변압기의 유증 CO<sub>2</sub> 가스량은 시료 채취시의 유온에 따라 증가되는 경향이 있고 유증가스 농도는 유온에 영향을 받기 때문에 유증가스 분석을 해석할 경우에 주의하여야 한다.

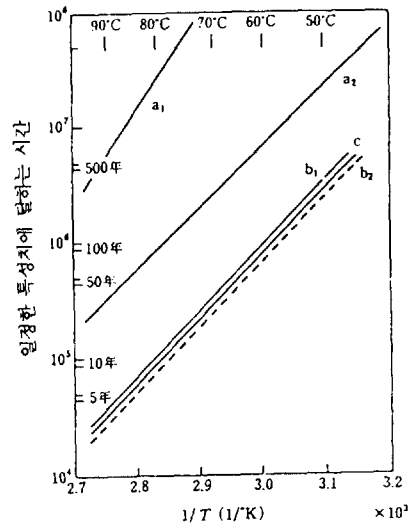
## 3.5 변압기 수명진단기법

초고압 내용량 변압기는 평균 수명이 30년에 달하는 것으로 나타나고 있으며, 급후 평균수명은 증가할 것이다. 따라서 예측

보전의 관점에서 변압기의 잔여 수명예측의 필요성이 증가하고 있다. 최근 변압기 수명진단기법으로 절연지, 프레소보드 등의 셀룰로스계 재료에 대한 기계적 성질, 평균중합도와 절연유의 CO+CO<sub>2</sub>와 경년열화의 관계에 대한 연구가 진행중에 있다.

### 3.5.1 유입 변압기 절연재료의 경년열화

절연재료의 경년열화에 있어서는 많은 보고가 있지만 일반적으로 온도에 의존하는 경우가 많다. 그림 3에 절연지의 절연파괴 전압, 인장강도, 평균중합도가 일정한 값에 도달하기까지의 시간과 온도와의 관계를 나타내었다. 여기서 어느 특성이 변압기의 수명에 밀접한 관계가 있고, 어느 정도변화를 수명말기로 판정하는가가 문제이다.



기호	측정치	열화조건
a <sub>1</sub>	절연파괴전압 50%잔율	N <sub>2</sub> 중
a <sub>2</sub>	절연파괴전압 50%잔율	대기중
b <sub>1</sub>	평균중합도 50%잔율	N <sub>2</sub> 중
b <sub>2</sub>	평균중합도 50%잔율	절연유중
c	인장강도 50%잔율	절연유중

그림 3. 절연지의 특성이 일정한 값에 도달하기까지의 시간과 가열온도특성

### 3.5.2 경년열화에 의한 절연파괴전압의 저하

절연유의 절연파괴전압은 20~30년 운전된 변압기에서도 초기치의 약 10% 정도밖에 저하되지 않고 변압기의 운전에 지장이 없는 것이 보통이다. 또한 체적저항율, 전산가 등의 특성은 운전년수에 따라 저하, 증대하는 경향이 다르므로, 변압기 수명과의 관계는 깊지 않다. 그러므로 절연유의 절연열화에서 변압기의 수명을 예측하는 것은 곤란하다. 절연지의 절연내력에 있어서도 30년간의 운전후에서도 15~20% 정도 저하되므로 수명에 큰 영향은 없다.

### 3.5.3 절연지의 인장강도

장기간 정상으로 운전한 변압기에서 채취한 절연지의 인장

강도는 30년 운전된 경우 초기치의 약 30~70% 저하되며 외 부단락시 절연지의 강도상에 문제가 발생할 가능성이 있다.

### 3.5.4 절연지의 평균중합도

셀룰로오스계 재료는 산화열화하면 셀룰로오스 분자의 구조가 절단되어 셀룰로오스 분자의 저분자량화, 즉 평균중합도의 저하가 발생한다. 이 평균분자량은 셀룰로오스계 재료의 기계적 강도의 열화 지표가 된다. 변압기에서 절연지를 채취하여 측정된 평균중합도와 변압기 운전시간과의 관계에서 30년간 사용된 변압기에서는 평균중합도가 30~70% 정도된다.

## 3.6 유증가스 분석의 향후과제

### 3.6.1 진단법의 개선

현재 적용하고 있는 국내의 유증가스 분석기술은 시료를 수동으로 채취하여 운반하고 분석하는 수동방식에 의한 진단법이기 때문에 변압기 이상유무의 진단까지는 장시간이 소요될 뿐만 아니라 급속히 진행되는 이상발생시는 효과적인 진단법이 되지 못하며, 절연유 채취와 분석에 따른 인력 및 시간의 과다한 소요가 불가피한 실정이다. 최근 자동 또는 휴대용 분석기기에 의해 유증 가연성가스 총량이나 특정가스를 상시 감시할 수 있는 장치에 대한 연구가 활발히 진행중에 있으며, 변전소의 무인화 추세가 점차 확산될 것으로 전망됨에 따라 변전설비의 종합 예방진단시스템과 연계시켜 컴퓨터에 의한 종합 관리시스템을 구축하는 보다 효과적인 진단기술의 정립이 향후 필수과제이다.

### 3.6.2 진단기술의 향상

현재의 진단기술은 내부이상의 종류에 대해서는 판별이 가능하나, 이상부위의 검출 및 이상의 크기 추정은 거의 불가능하다. 예를 들어 변압기내에서 금속구조물이 과열된 경우 가연성가스의 패턴에 의한 진단법 또는 성분의 조성비를 이용하는 방법 등으로 판별이 가능하지만 과열의 발생부위 검출이나 과열면적 등의 추정은 불가능한 실정이기 때문에 향후 진단기술의 향상이 요구되고 있다. 또한 유증가스 분석기술은 측정자 및 측정기기에 따라 큰 차이가 있기 때문에 측정법의 표준화도 앞으로의 과제라 할 수 있다.

### 3.6.3 수명진단기술의 확립

현재 국내에서는 운전개시 후 20~30년 경과한 변압기가 증가하고 있으므로 이들 변압기의 열화진단 및 수명진단이 중요한 과제로 대두되고 있다. 충분한 실험실적 검토뿐만 아니라 경년에 따라 발생하는 가스의 종류 및 가스량 등에 대한 평가를 통하여 경년 변압기의 수명진단기술이 확립되어야 할 것이다.

## 4. 부분방전 측정

변압기는 장기간 운전됨에 따라 각 부분의 열화 등에 의하

여 전기적, 기계적인 성능이 저하하여 이상을 나타내는 경우가 있고, 그 이상에 의하여 방전이 발생하면 중대한 사고에 이르는 경우가 있다. 변압기의 중대사고 요인인 내부절연 이상은 돌발적인 사고를 제외하고는 대부분 부분방전을 수반하므로, 부분방전과 절연수명은 깊은 상관관계가 있다고 인정되어 왔다. 또한 부분방전은 이상상태 발생시 다른 징후보다 응답이 빠른 특성을 지니고 있으므로 부분방전을 지속적으로 관찰하면 변압기 사고를 미연에 방지하거나 감소시킬 수 있는 유효한 방식이다. 변압기 내에서 발생하는 부분방전을 검출할 수 있는 방법으로는 로고우스키 코일(rogowski coil)을 이용하여 부분방전에 의한 전류펄스를 검출하거나, 변압기 외함에 초음파 탐촉자를 설치하여 초음파 신호를 검출하는 두 가지 방식이 있다.

### 4.1 전기적 측정법

#### 4.1.1 부분방전 검출회로

펄스전류를 외부에서 검출하는 기본적인 회로는 그림 4와 같이 공시물에 인가하는 전원, 펄스전류를 펄스전압으로 변환하는 검출 임피던스, 펄스전류가 검출 임피던스에 유효하게 흐르도록 폐회로를 형성하기 위한 결합 콘덴서, 검출 임피던스의 출력을 측정하는 장치로 구성된다. 일반적으로 전원과 공시물 사이에는 전원에서의 전원 잡음의 유입, 부분방전 펄스전류의 전원으로의 유출을 방지하기 위한 저항, 인덕턴스 등의 폐회로를 삽입한다. 검출 임피던스의 접속위치는 다음과 같다.

(a) 공시물의 고압측 단자에 접속된 결합 콘덴서의 접지단자와 대지 사이

(b) 공시물의 접지측 단자와 대지 사이

#### 4.1.2 현장에서의 펄스전류 검출방법

현장에서의 부분방전이 발생할 때 동반되는 전류펄스를 검출하는 방법으로는 기본적으로는 그림 4에 나타난 기본회로를 이용하며, 권선 중성점에 상용주파전류와 중복되어서 흐르는 방전전류를 로고우스키 코일 타입의 고주파 펄스 CT로 검출하는 펄스 CT법과 고압 부상에서 방전전류를 검출하는

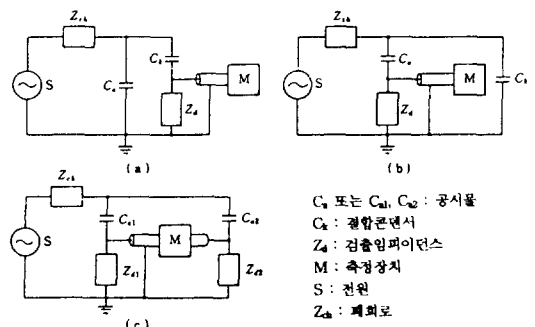


그림 4. 부분방전 검출의 기본회로

부싱탭법, 변압기 탱크 접지선에 로고우스키 코일을 설치하여 검출하는 방법이 있다.

(a) 부싱을 이용하는 방법

콘덴서형 부싱을 사용하는 경우에는 부싱의 전압측정용 단자 또는 시험용 단자에서 부분방전에 의한 펄스전압을 검출할 수 있다. 이 방법은 공장에서의 부분방전 펄스 검출방법과 같이 감도적으로는 아주 우수하지만, 측정선을 연결하는 경우에는 변압기를 정지할 필요가 있는 등 실용면에서 곤란하다.

(b) 중성점 접지선을 이용하는 방법

중성점이 직접 접지된 경우에는 중성점의 접지선에 고주파 특성의 CT를 삽입하여 부분방전 펄스전류를 검출할 수 있다. 이 방법은 감도적으로는 부싱을 이용하는 방법에 비하여 약간 떨어지지만 취부가 용이하므로 실용적이다. 그러나 중성점이 직접접지가 아닌 경우에는 검출감도가 저하되는 문제가 있다.

(c) 변압기 본체 접지선을 이용하는 경우

부분방전 펄스 전류는 변압기 본체의 접지선에 로고우스키 코일을 삽입하여 검출할 수 있다. 이 방법은 환선상태에서도 로고우스키 코일을 취부하기가 용이하고 구조가 간단한 잇점이 있지만 검출감도가 적다.

4.2 음향적 측정법

변압기 내부에서 부분방전이 발생할 경우, 일반적으로 그 부위에는 국부적인 발열을 동반하고 그 발열원에 의해 주변의 절연유가 급격한 압축을 받아 충격파로 유중에 전달되는 펄스형태의 음파와 초음파가 발생된다. 음파는 외부소음과 구별이 되지 않으므로 초음파를 검출하여 부분방전을 탐지하면 변압기의 부분방전감시가 가능하다. 초음파를 이용한 예방진단의 장점은 이상발생부의 위치표정이 가능하므로 이상부위의 수리를 용이하게 할 수 있으며 수리비와 수리시간을 최소화할 수 있다. 또한 현장에서도 전기적 노이즈의 영향이 별로 없기 때문에 신뢰성이 높으며 변압기의 운전상태에서도 절연이상을 검출할 수 있으므로 변압기의 초기고장을 조기에 발견하여 사고를 미연에 방지할 수 있다. 초음파를 이용한 변압기 진단은 전류측정법과 같은 특별한 시험회로가 필요없으며, 탐촉자를 변압기 외함에 자석을 이용하여 부착하기 때문에 측정이 간편하다. 또한 초음파 탐촉자는 변압기 상태와는 독립적으로 취부할 수 있으므로 운전 중에도 보수, 점검이 가능하다.

4.2.1 초음파 측정에 의한 변압기 진단

변압기 구조물에 의해 초음파 신호는 초음파 탐촉자에 도달할 때까지 감쇄하고, 거리에 따라서도 감쇄하므로 초음파 신호의 크기로 부분방전량을 추정하는 것은 곤란하다. 따라서 부분방전에 의한 초음파를 이용하여 변압기를 진단할 경우에는 초음파 신호의 절대적인 크기보다는 기준레벨 이상의 초음파 신호를 계수하여 초음파 신호 수의 시간적 변화경향으로 부분방전의 진전상황을 파악하는 것이 보다 중요하다.

4.2.2 부분방전의 위치추정

(1) 전기-초음파 신호를 이용하는 방법

변압기의 예방진단에는 이상개소의 조기제거와 복구를 위하여 부분방전이 발생하는 부위를 명확히 파악하는 것이 중요하다. 부분방전의 발생위치는 로고우스키 코일로 부분방전에 의하여 발생하는 전기적인 펄스를 검출하고 변압기 탱크에 취부된 초음파 탐촉자로 초음파 신호를 검출하여 두 신호간의 시간 차를 이용하여 부분방전의 발생위치를 추정할 수 있다. 전기적인 신호 측정시간( $T_e$ )과 초음파 신호 측정시간( $T_u$ )과의 시간차를  $\Delta t$ , 변압기 절연유에서의 음속을  $v$ 라 하면 부분방전 발생위치에서 초음파 탐촉자까지의 거리  $D$ 는 다음과 같이 된다.

$$D = v \times (T_e - T_u)$$

부분방전 발생점의 위치추정은 3각 측량법 또는 뉴턴-랩슨(Newton-Raphson)법으로 부분방전의 발생위치를 추정할 수 있으며 정확한 위치를 추정하기 위해서는 3곳 이상에서의 측정이 필요하다. 따라서 변압기 탱크 벽에 3~4개의 초음파 탐촉자를 설치하거나, 초음파 탐촉자를 3~4번 이동하여 측정하면 부분방전의 발생위치를 추정할 수 있다.

(2) 초음파-초음파 신호를 이용하는 방법

변압기 내에서 부분방전이 발생하는 경우, 변압기 외함에 설치된 복수의 초음파 탐촉자에는 부분방전 발생위치에서 초음파 탐촉자까지 유종을 초음파가 전파해 가는 시간만큼 검출이 늦어지기 때문에 각 초음파 탐촉자에 도달하는 시간은 다르게 된다. 따라서 부분방전의 발생위치는 2개의 초음파 탐촉자에서 검출된 초음파 신호의 도달시간 차이의 상호상관함수와 변압기 절연유에서의 음속에 의하여 거리의 차( $d$ )가 구해진다.

3차원 공간에서의 부분방전위치를 추정하기 위하여 초음파 센서  $AS_1, AS_2$ 의 위치를  $AS_1(x_1, y_1, z_1), AS_2(x_2, y_2, z_2)$ , 부분방전점(PD)의 좌표를  $P(x, y, z)$ , 그리고  $AS_1P = l_1, AS_2P = l_2$ 라 하면

$$d_1 = l_1 - l_2 > 0 \quad (l_1 > l_2 \text{라 가정})$$

가 구해진다. 여기서  $l_1$ 과  $l_2$ 의 측정시에  $d_1$ 의 부호는 초음파 신호 상호상관함수의 계산에 의해서 결정된다. 센서의 위치를  $AS_3(x_3, y_3, z_3), AS_4(x_4, y_4, z_4)$  또는  $AS_5(x_5, y_5, z_5), AS_6(x_6, y_6, z_6)$ 로 이동시켜서 측정했을 경우

$$d_2 = l_3 - l_4 > 0$$

$$d_3 = l_5 - l_6 > 0$$

가 구해진다. 여기서 센서의 좌표를 대입하면

$$d_1 = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2}$$

$$- \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} > 0$$

가 구해진다. 따라서

$$A_1x^2 + B_1y^2 + C_1z^2 + D_1xy + E_1xz + P_1yz + Q_1x + R_1y + S_1z + T_1 = 0$$

가 된다. 여기서

$$f_1(x, y, z) = A_1x^2 + B_1y^2 + C_1z^2 + D_1xy + E_1xz + P_1yz + Q_1x + R_1y + S_1z + T_1$$

$$f_2(x, y, z) = A_2x^2 + B_2y^2 + C_2z^2 + D_2xy + E_2xz + P_2yz + Q_2x + R_2y + S_2z + T_2$$

$$f_3(x, y, z) = A_3x^2 + B_3y^2 + C_3z^2 + D_3xy + E_3xz + P_3yz + Q_3x + R_3y + S_3z + T_3$$

라 놓으면 함수  $f_1(x, y, z)$ 은 초음파센서  $AS_1, AS_2$ 에서의 거리차가  $d_1$ 의 일정한 점들의 집합이며 3차원 공간에서 곡면을 나타낸다. 또한  $f_2(x, y, z), f_3(x, y, z)$ 도 3차원 공간에서 같은 형태의 각각의 곡면을 나타내게 된다. 따라서 이 세개의 곡면의 교점이 부분방전의 위치가 된다.

### 5. 변압기 예방보전 시스템

현재 유중 가스분석은 현지에서 채유된 샘플을 시험실에 운반하여 가스 크로마토그래피로 분석하여 변압기의 이상유무를 진단하고 있다. 이러한 방법은 가스분석을 위한 시간 및 비용이 많이 드는 단점이 있다. 따라서 최근에는 유중 가스분리부를 변압기에 고정시켜 온라인에서 자동으로 진단하는 방법이 개발되어 실용화에 이르고 있다. 가스 검지방식중 가스 크로마토그래피방식은 컬럼(column) 충전제내를 투과한 가스의 이동시간차를 검지하는 방식으로서, 여러 성분의 가스를 높은 정밀도를 가지고 검지할 수는 있으나, 구조가 복잡하고 가격이 비싸다는 단점이 있다. 따라서 특정가스만을 집중 분석하거나 가연성 가스총량을 검출하여 이상의 유무를 판단하는 방법도 개발되고 있다.

특정가스중 단일성분의 분석대상 가스로는 수소가스가 가장 널리 적용되고 있는데, 이러한 진단기술의 근거는 내부이상시 수소가스는 다른 가스와 동반하여 필히 발생하며, 내부이상이 진전됨에 따라 발생하는 수소가스량은 비례적으로 증가 경향을 보이기 때문이다. 이와 같이 수소가스는 내부이상 및 다른 가스와의 상관관계가 클 뿐만 아니라 절연유중의 용해도가 용존가스중 가장 낮기 때문에 추출이 쉽다는 등의 이유 때문에 수소가스만의 단독 가스분석으로도 내부이상을 진단하는데 유용하게 적용되고 있다. 수소가스와 같은 단일 성분가스를 검지하고자 하는 경우 적용이 유리한 방식으로는

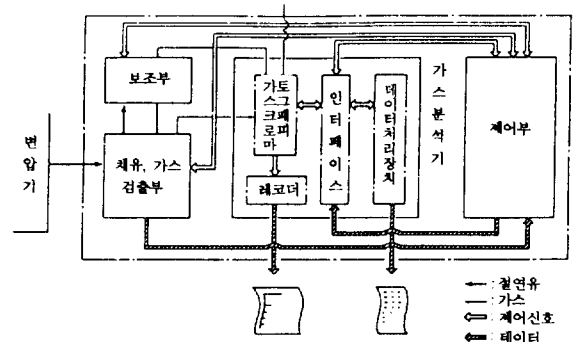


그림 5. 가스 자동분석장치의 구조도

가스센서 방식을 들 수 있는데, 반도체식과 접촉연소방식이 있으며, 전자는 가스흡착에 의한 반도체의 저항변화를, 후자는 가스의 연소에 의한 발열을 저항변화로써 검지한다. 가스센서는 구조가 간단하고 가격이 저렴하다는 장점이 있으며, 최근 센서 기술의 발달로 많은 센서가 실용화가 되어 있어 측정 범위 및 측정방식과 정밀성 등을 고려하여 이용할 수 있다.

최근 변압기의 내부진단을 목적으로 유중가스 자동분석장치는 물론 부분방전, 누유, 유온도, 부하시 탭 절환장치 등을 조합한 상시감시장치가 개발되고 있다. 이 장치는 각종센서를 변압기에 취부하고, 그 센서에서 취득된 정보를 컴퓨터로 데이터 처리하여 변압기의 상태를 기록하고, 분석하여 경보를 표시할 수 있도록 시스템화된 경우가 많다. 또한 기타 기기를 포함한 변전소 전체에 대한 상시감시 시스템도 개발되고 있다.

### 6. 결 언

설비유지보수 기술에는 설비의 안전확보 및 이용을 향상, 보수비용의 절감이 주요한 과제로 되고 있다. 따라서 보수에 대한 관심이 세계적으로 높아지게 되어 설비고장의 검출 또는 예측기술에 관한 연구가 활발히 이루어 지고 있다.

변압기를 진단하기 위하여 현재 적용하고 있는 국내의 기술은 순시점검 및 정기정검과 시료를 정기적으로 채취하여 분석하는 가스분석에 의존하고 있는 실정이다. 이 보수관리법은 순간적인 돌발사고 이외에는 이상현상을 초기단계에서 검출 가능하므로 사고를 미연에 방지할 수 있는 효과적인 방법으로 평가되고 있다. 그러나 이상현상을 직접적으로 검출하는 방법이 아니고, 이상현상이 발생될 경우에 파생적으로 발생하는 가스를 분석하여 이상현상을 추출하는 방법이므로 이상현상의 진단에는 한계가 있다. 따라서 최근 자동 또는 휴대용 가스분석기에 의해 유중 수소 또는 특정가스를 상시감시할 수 있는 장치에 대한 활발한 연구가 진행중에 있다. 또한 변전소의 무인화 추세가 점차 확산될 것으로 전망됨에 따라 변전설비의 종합 예방진단시스템과 연계시켜 컴퓨터에 의한 종합 관리시스템을 구축하는 보다 효과적인 진단기술의 정립이 향후 필수과제로 전망된다.

참 고 문 헌

[1] D. A. Natrass, "History of Partial Discharge Research," IEEE Trans. EI, Magazine, Vol. 9, No. 4, pp.27~31, 1993.

[2] 곽희로 등, "전력기기 예방진단 기술 연구," 한국전력공사보고서, pp.19~115, 1988.

[3] 田中一郎 外, "變壓器の豫防保全技術の現況とその動向," 電氣學會, pp.3~48, 1990.

[4] 남창현 등, "변압기 유중가스 상시감시 시스템의 운용 연구," 한국전력공사, pp.1~78, 1995

[5] M. Yamada et al., "Automatic Field Monitoring of Dissolved Gases in Transformer Oil," IEEE Trans. PAS, Vol. 100, No. 4, pp.1538~1544, 1981.

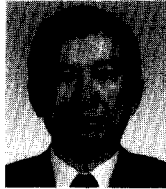
[6] Y. Kawaguchi and S. Yanabu, "Partial Discharge Measurement on High Voltage Power Transformers," IEEE Trans. PAS, Vol. 88, No. 8, pp.1187~1194, 1969.

[7] 권동진 등, "변전설비 진단기술 개발연구," 전력연구원 보고서, pp.281~361, 1996

[8] 松浦 虔士 外, "電力設備の運轉中の絶縁診断技術," 電氣學會, pp.3~166, 1992.

[9] 久保義昭 外, "變壓器部分放電自動監視装置の開発とフィールド試験," 電氣學會, Vol. 26, No. 3, pp.10~18, 1982.

저 자 소 개



곽희로(郭熙魯)

1942년 3월 1일생. 1967년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1978년 호주 New South Wales대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1967년 한전근무. 1986년 미국 MIT

Visiting Scientist. 현재 숭실대 공대 전기공학과 교수, 공대학장. 당 학회 조사이사.