

전기설비의 고장진단

전기설비를 운전·관리하는 전기 기술자는 설비가 안전한지 항상 마음을 쓰게 될 것이다.

전기설비를 장기간 안전하게 사용하는 것은 바람직한 일이지만 최근 그런 경향이 강해져, 과거에 시행했던 사후보전을 넘어서 예지보전의 요망이 점차 높아가고 있다.

이와 같은 전기설비의 예지보전을 목표로 고장진단기술에 관한 근본적인 고찰과 그 응용기술을 전기 기술자에게 제공, 활용토록 하기 위하여 그 내용을 연재한다.

<편집자주>

1. 머리말

전력은 각종 산업이나 일상생활에서 필요 불가결의 것으로 되어 있다.

최근의 전력용 변압기는 재료, 설계법, 제작기술 등의 진보로 신뢰도가 현저하게 높아졌다고 할 수 있지만 불가항력에 의한 외적인 요인이나 사용방법, 운전보수에 따라서는 뜻하지 않은 사고가 발생할 수 있다. 변압기는 수변전설비 중에서도 중요한 기기이며 한번 사고가 발생하면 복구에 장시간을 요하고 그 미치는 영향이 크다.

전기설비의 보수, 보전에 종사하는 기술자로서 사고를 미연에 방지하는 것은 최대의 사명이며 만일 미연에 방지하는 못하였다더라도 사고의 초기단계에서 발견하여 사고의 확대를 최소한으로 억제하고 1분이라도 빠른 복구에 노력해야 된다. 이를 위해서는 일상적인 보수, 점검을 철저히 해야 되며 이것이 사고의 미연방지, 고장의 조기발견과 연결된다.

여기서는 유입풍냉식의 일반적인 변압기에 대하여 고장의 종류와 일상적 보수, 점검에서 발견할 수 있는 이상현상, 내부사고의 검출 및 진단법에 대하여 설명하기로 한다.

2. 변압기의 고장 원인과 종류

(1) 변압기의 고장 원인

고장의 원인은 일반적으로 매우 복잡하고 분명하지 않은 경우가 많은데 그 원인을 찾는 것은 고장대책상 반드시 필요하다. 고장원인을 분류하면 다음과 같다.

(a) 시방의 불량으로 인한 것

- (i) 절연단계 선정의 미스
- (ii) 전압, 템의 부적합

- (iii) 용량 부족
- (iv) 주위조건의 부적합(염해, 유해가스, 온도, 습도)
- (v) 불명확한 특수사용 조건(예를 들어 펄스 상 이상전압이나 단락빈도가 높은 등)

(b) 제작 불량에 의한 것

- (i) 재료의 불량(도전재료, 자기재료, 절연재료)
- (ii) 설계, 공작의 불량

(c) 설치, 보호기기의 불량에 의한 것

- (i) 설치불량
- (ii) 피뢰기의 선정불량
- (iii) 보호계전기, 차단기의 불량

(d) 운전, 보수의 불량에 의한 것

- (i) 절연유의 열화
- (ii) 과부하, 오결선
- (iii) 외부도체 접속부의 이완, 발열
- (iv) 각종 부속품, 계전기 관계의 보수, 점검불량

(e) 이상전압에 의한 것

(f) 자연열화에 의한 것

(g) 천재에 의한 것

(h) 외적 물체에 의한 것

(2) 고장의 종류

고장의 종류에는 부속품(온도계, 유면계)의 불량에서 권선의 절연파괴에 이르기까지 다종 다양하다.

(a) 변압기의 내부고장

- (i) 권선 : 절연파괴, 단선, 변형
- (ii) 철심 : 적층 강판간의 절연불량, 접지불량, 철심관통 볼트의 절연파괴
- (iii) 내부 부착기구
- (iv) 탭 전환기, 인출선

(v) 절연유 열화

(b) 변압기의 외부고장

- (i) 외함 : 용접부, 패킹 불량
- (ii) 탭 전환장치 : 기계적 구동부분, 제어장치
- (iii) 냉각장치 : 냉각선, 송유 펌프, 제어장치
- (iv) 부속품 : 온도계, 부상, 유면계, 각종 계전기 또한 고장의 발생과정에 따라 분류하면 다음과 같다.

(c) 돌발적으로 발생하는 고장

- (i) 이상전압(외뢰, 내뢰)에 의한 절연파괴
- (ii) 외부 단락사고에 의한 권선의 변형, 층간 단락
- (iii) 천재 : 지진, 화재 등
- (iv) 보기(補機) 전원의 정전

(d) 경년적으로 발전되는 고장

- (i) 철심의 절연불량 : 적층 동판간의 절연불량, 철심관통 볼트의 절연불량
- (ii) 외부단락의 반복에 의한 권선의 변형
- (iii) 과부하 운전에 의한 절연열화
- (iv) 흡습, 코로나 발생으로 인한 절연물, 절연유의 열화

3. 일상점검에서 발생하는 이상의 원인과 그 대책

돌발적으로 발생하는 사고는 일반적으로 외적 요인에 기인하는 경우가 많으며 예측할 수가 없지만 기타의 사고는 일상점검시에 충분히 주의를 하면 어떤 형태로든지 그 이상 현상이 나타나며 초기단계에 대책을 강구할 수 있는 경우가 많다.

여기서 일상점검에서 발견되는 이상과 원인, 그 대책을 표 1에 들었다.

4. 내부고장의 검출

진압기의 내부고장 검출에는 각종 보호계전기



<표 1> 일상점검에서 발견되는 이상과 원인, 그 대책

No.	이상현상	이상의 판정	추정 원인	대 책
1	온 도	① 온도계의 지시치가 규격에 정해져 있는 허용한도를 초과하고 있을 때 ② 허용한도내라도 부하율과 주위온도로 미루어 볼 때 이상치인 때	① 과부하	• 부하의 저감 또는 유입변압기 운전지침의 한도로 부하를 조정한다.
			② 주위온도(40℃ 초과)	• 부하의 저감 • 냉각 팬의 설치 등으로 강제 냉각.
			③ 냉각 팬, 송유 펌프의 고장	• 부하의 저감 • 불량기의 수리, 교환
			④ 방열 벨브의 개방 방지	• "개"로 한다.
			⑤ 오일 누설로 인한 오일 부족	• 유량의 항 참조
			⑥ 온도계의 불량	• 2종의 온도계기 부속되어 있을 때는 비교해 본다. 탱크벽에 동상 온도계를 부착하여 정상 여부를 확인. • 불량품은 교체한다.
			⑦ 내부이상 ①~⑥의 해당사항이 없는 경우에는 내부고장으로 판단한다.	• 5, 6, 7로 진단한다.
2	음향진동	① 정상시의 여자음, 진동을 기억해 두고 그것과 다른 이상음, 이상진동이 있을 때(가령 높은 여자음) ② 탱크벽에 귀를 대 보아 내부이상음이 들릴 때	① 과전압, 주파수의 변동	• 수전전압에 적합한 탭으로 전환
			② 죄임부의 이완	• 발생성소를 조사하여 죄임다.
			③ 접지불량, 또는 비접지 금속체에 의한 정전방전	• 외부의 습지를 조사하여 이상이 없으면 정전시키고 내부점검을 한다.
			④ 철심의 죄임부량에 의한 균열 등	• 들어올려 내부 점검
			⑤ 사이리스터 부하에 의한 고조파(위상제어시)	• 정도에 따라 그대로 사용할 수 있는 것과 없는 것이 있으며 메이커와 상의한다. • 기본적으로 변압기의 시방이 고조파를 고려한 것이라야 된다.
			⑥ 편자(예컨대 직류편자)	• 편자가 생기지 않는 사용법으로 고친다. • 변압기의 시방은 편자를 고려한 것으로 변경한다.
			⑦ 냉각팬, 송유 펌프의 베어링 마모, 블레이어링의 균열	• 진동상태, 전류치 등에 의하여 운전의 가부류 판단 • 부품과 교환, 수리 • 운전할 수 없을 때는 부하를 저감시킨다.
			⑧ 외함, 방열기 부속품의 공진, 공명	• 죄임부의 이완이 어떤 부하전류에서 농진하는 수가 있다. 더 죄어준다. • 주파수 변동에 의한 공진, 공명이 있다. 주파수 체크
			⑨ 탭 전환기구의 이상	• 변형 탭 전환기의 고장진단 참조
			⑩ 코로나 발생음	① 자기, 애관 표면의 진애, 염분부착에 의한 오손
3	냄새변색	① 도전부(부식 단자)의 과열에 의한 변색, 이상한 냄새	① 죄임의 이완 ② 접촉면의 산화	• 더 죄어준다. • 접촉면속 닦는다.
		② 외함 각부의 극부과열에 의한 장치의 변색	① 누설 자속 ② 와류형상 전류	• 조속히 내부들 정밀 점검한다.
		③ 이상한 냄새	① 냉각 팬, 송유 펌프 소손 ② 애관 오손에 의한 코로나 발생으로 인한 오존 냄새	• 부품과 교환 • 코로나 발생음의 항 참조
		④ 온도상승 과대	① 과부하	• 부하의 저감
		⑤ 흡습제의 변색(담색(淡桃)색으로 변화)	① 흡습	• 부품과 교체 또는 가열 재생(100~400℃)
4	유량(오일누설)	① 유면계의 지침이 정상위치에서 크게 저하	① 오일누설(밸브류, 패킹, 용접 불량)	• 누설장소의 조사, 수리
			② 내부고장으로 인한 오일 분출	• 5, 6, 7로 진단
			③ 유면계의 불량 ①, ②의 불량기 아닌 때	• 부품과 교환 또는 수리

No.	이상현상	이상의 판정	추정원인	대책
5	가스누설	① 유량과 가스압의 관계가 정상치보다 저하	① 각 패킹의 노화 ② 씌입부의 이완 ③ 용접부 불량	• 누설검사(비눗물 방법)를 하여 수리한다.
6	이상가스	① 브프홀츠 계전기 가스실내의 가스의 유무 ② 브프홀츠 계전기 제1단 동작	① 유해 코로나에 의한 절연물의 노화 ② 철심의 이상 ③ 도전부의 국부 과열 ④ 오동작	• 가스를 빼고 분석한다. 표 4, 5 참조 • 가스분석 결과에 따라서는 운전 정지, 5, 6, 7에 의하여 진단한다.
7	철부분의 녹	철의 균열, 부풀음, 벗겨짐	자외선, 온도, 습도 또한 산, 염분을 포함한 분위기 등으로 인한 노화	• 녹, 철을 벗겨 청소하고 재도장한다.
8	호흡장치의 동작불량	유에 변화가 있어도 오일포토내의 2실의 유연차가 생기지 않는 경우	변압기측의 가스 누설	• 누설장소를 조사하여 수리
9	자기 예관 표면의 이상	자기 예관 표면의 균열, 방전 흔적	외뢰, 내뢰 등에 의한 이상전압	• 균열의 정도에 따라서는 부실 교체 • 어레스터가 설치되어 있는 것은 일단 방전개시전압을 체크한다.
10	방전장치의 이상	① 방전판의 균열, 파손	① 내부고장 [브프홀츠 계전기, 압력계전기, 차동계전기 등의 동작이 있으면 내부고장으로 판단해도 된다.] ② 호흡불능에 의한 내압 상승이나 방압판의 열화 [방압장치만 동작하고 다른 이상 이 없을 때	• 이 경우에는 정전이 된다. 5, 6, 7로 진단 • 호흡장치의 구멍이 막힌 것을 고친다.

와 검출장치가 사용되고 있다.

기계적으로 검출하는 것으로는 브프홀츠 계전기, 압력계전기, 유류계전기, 방압장치 등이 있으며 전기적으로 검출하는 것으로는 차동계전기, 과전류계전기, 지락계전기 등이 있다. 이 기기의 동작요인(사고내용)과 용도는 표 3과 같다. 또한 변압기 보호의 단선 결선도의 일례를 그림 1에 들었다.

용되고 있는 계전기로서 제1단은 경고장용이고 변압기내의 절연물, 유기질의 구조재료가 소손되거나 오일의 열분해에 의한 가스가 발생하여 가스실

(1) 기계적 검출법

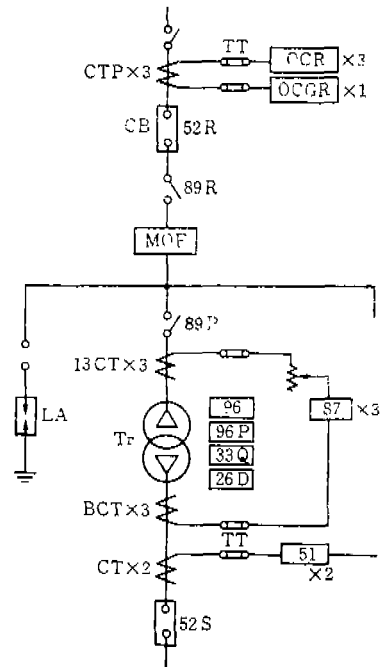
(a) 브프홀츠 계전기

이것은 콘서베이터가 부속된 변압기에 널리 채

<표 2> 온도에 관한 측정(JEC-204)

측정위치	권선	오일 자연순환의 경우	55
			오일 강제순환의 경우 <td>60</td>
[℃]	오일	본체 탱크 내의 기름이 직접 외기와 접촉하는 경우	50
		본체 탱크 내의 기름이 직접 외기와 접촉하지 않는 경우	55
[℃]	상기	최고	40
		일간 평균	35
	올	연간 평균	20
		최고	25

(주) 개방형 콘서베이터가 있는 경우를 포함



<그림 1> 변압기 보호 단선결선도의 일례



<표 3> 변압기 보호계전기

보호계전기		검출방법	동 작 요 인 (사 고 내 용)	용 도
명 칭	기구번호			
차동계전기	87	전기적	권선의 총간, 단자부의 단락에 의한 단락전류	트립용
과전류계전기	51	전기적	상기 외에 변압기의 외부단락에 의한 단락전류, 과부하전류	트립용
지락과전류계전기	51G	전기적	변압기 외부의 지락전류, 권선과 철심간의 절연파괴에 의한 지락전류	트립용
브프홀츠 계전기	96	기계적	이상과열 및 유중 아크에 의하여 발생하는 가스압, 유유, 유면저하	제1단 경보용 제2단 트립용
충격압력계전기	96P	기계적	이상과열 및 유중 아크에 의하여 급격한 유압, 가스압 상승	트립용
유면계전기 (접점불이 유면계)	33Q	기계적	오일누설에 의한 유면 저하	경보용
온도계전기 (접점불이 유면계)	69Q	기계적	유류의 정지	경보용
유류계전기	69Q	기계적	유류의 정지	경보용
방압장치	96	기계적	이상과열 및 유중 아크에 의한 내압상승으로 인한 분출	경보용

<표 4> 발생가스의 색별에 의한 고장 추정

발생가스의 색별	추정 고장장소
회 색	오일의 분해(유중 아크)
황 색	지지목 등 목재의 손상
백 색	절연지의 손상

에 일정량 이상 체류되면 동작한다. 제2단 접점은 중고장용으로, 변압기 내부의 절연 파괴, 단선 등에 의한 유중 아크 및 2차적 열에 의하여 절연물이나 기름의 분해발생 가스가 생겨 변압기 내압이 급격히 상승하여 콘서베이터에의 기름의 흐름이 급격해졌을 때 동작한다.

브프홀츠 계전기의 특징은 권선사고 등의 큰 사고를 제2단에서 검출하는 외에 접촉불량, 철심의 적층 강판간의 절연불량, 유면 저하 등 초기의 경미한 국부사고가 조기에 제1단에서 검출된다는 것이다.

또한 가스실에 체류된 가스의 양이나 성분에 따라 고장 상태나 정도를 어느 정도 상정할 수 있다. 발생 가스의 색별에 의한 추정 고장을 표 4에 들었다. 또한 발생 가스의 종류와 가스 발생속도와 고장내용의 관계를 표 5에 들었다.

브프홀츠 계전기도 간혹 오동작을 하는 수가 있다. 제1단 오동작의 원인은 운전 초기에 나타나는 가스의 방출 및 절연유 중에 유해한 가스가 온도 변화에 의하여 과포화가 되어 이것이 가스실에 모

이는 경우이고, 제2단 오동작은 지진에 의한 진동 또는 송유 펌프 기동시의 유압 충격에 의한 것이다. 지진에 의한 오동작 방지는 지진계를 제2단 접점에 직렬로 넣고 지진계도 동시에 동작한 경우에는 제2단 트립 회로가 형성되지 않도록 되어 있다.

또한 송유 펌프 기동시의 오동작 방지는 송유 펌프 기동시 일시적으로 제2단 트립 회로를 룩하는 방법이 있는데 룩할 때에 사고가 발생하지 않는다는 보장이 없으므로 문제가 된다.

(b) 충격압력계전기, 유류계전기

변압기의 내부사고는 반드시 분해 가스의 발생을 수반하며 충격상의 이상압력 상승을 초래한다. 이 압력상승을 순시에 검출하여 동작하는 것이 충격압력계전기이고, 유류계전기는 압력 상승에 의해 본체에서 콘서베이터로 향하는 유류속도가 일정치 이상이 되었을 때 동작한다. 이같은 계전기 동작과 변압기 고장과의 관계는 브프홀츠 계전기의 제2단 동작시와 대체로 같다.

(c) 방압장치

방압장치는 내압(內壓)이 일정한 값까지 상승했을 경우에 동작하여 내압을 외부로 방출함으로써 외함이나 방열기를 보호하는 장치이다.

동작과 변압기 사고와의 관계는 브프홀츠 계전기 제2단의 그것과 대체로 같다.

<표 5> 브프홀츠 계전기의 동작과 사고의 추정

가스의 정체	사고의 추정	동작이유	동작종류
가스 없음	다량의 금속이 260~400℃로 가열되었을 경우, 즉 접지사고, 단락사고로 절연물의 손상은 없는 경우	260~400℃에서의 오일의 기화	제2단 동작
공기 또는 불활성 가스뿐인 경우	변압기 외함, 배관, 브프홀츠 계전기 용기 등의 파손, 송유 펌프의 고장	기계적 고장으로 인한 누설 고장 대	제1단 동작으로 가스를 제거해도 즉시 반복 동작한다. A
		상 동 고장 중	가스를 제거해도 수분-수시간내에 다시 반복 동작한다. B
		상 동 고장 소	제1단 동작으로 가스를 제거한 경우 정상울 장시간 유지한다. C
	상기의 미약한 경우 및 삼완전한 오일의 충전 브프홀츠 계전기 용기의 글라스 파손	상 동 고장근소	제1단 동작 또는 브프홀츠 계전기에 다소 가스가 있다. D
수소뿐이고 일산화탄소가 없는 경우	국부적인 과전류에 의한 단자간 및 단자와 접지간의 단락, 고체 절연물을 포함하지 않는다.	기름만의 열분해 400℃ 이상	제1단 동작
			제2단 동작
			제1단 동작 A 또는 B
	상기에서 저전류인 경우, 즉 초기의 접촉불량, 철심관통공 부분의 소손, 리액터의 공극 가열, 철심의 접촉 불량 등		제1단 동작 C
	상기와 같이 경미한 경우 및 고전계에 의한 오일의 기화		
수소 및 일산화탄소	국부적인 과전류에 의하여 고체 절연물을 포함한 절연사고, 즉 절연도체와 접지간 단락, 권선간 단락	오일 및 고체 절연물의 연분해	제1단 동작 A 또는 B
			제1단 동작 C
	상기에서 저전류의 경우, 즉 절연도체와 어스간의 저전류, 아크에 의한 절연사고, 권선간의 고저항 단락 및 철심의 소손, 접속부의 고장 등의 사고 초기		
	상기의 극히 경미한 경우 및 절연물의 산화		제1단 동작 C

(2) 전기적 검출법

차동계전기, 과전류계전기, 접지계전기 등은 그 동작과 변압기 내부고장과의 관계는 기계적 계전기와 같으며 이것을 전기적으로 검출하는 것으로서, 권선단락사고, 접지사고에 대한 계전기이다.

대용량 변압기에서는 기계적 계전기와 전기적 계전기가 병용되는 경우 많다.

(a) 차동계전기

차동계전기는 변압기의 1차측과 2차측 각각 변압기의 권수비를 고려한 변류기를 설치하여 층간 단락 등으로 발생하는 전류치의 차로 동작하는 계전기이다. 따라서 운전중에 이것이 동작한 경우에는 층간단락 등 변압기의 내부 사고를 의미한다.

(b) 과전류계전기

과전류계전기는 기기 또는 회로의 단락사고 또는 과부하에 대한 보호계전기이다. 외부 회로에 상간단로의 이상이 없고 과부하도 아닌 경우에는

변압기의 내부단락을 예상해 본다.

(c) 지락 과전류계전기

지락 과전류계전기는 변압기 외부의 지락이나 권선과 철심간의 절연파괴에 의한 지락전류에 의하여 동작하는 것이다.

(3) 기타의 검출방법

유중 용존 가스 분석 결과에 의한 방법인데, 온도계의 이상지시에 의한 방법 또는 내부 이상음에 의하여 검지하는 방법 등이 있다.

5. 내부고장의 진단

보호계전기가 동작했을 때 또는 외관상태로 보아 내부에 이상이 있다고 인정될 때는 우선 그때의 상황, 즉 분유의 정도, 음향, 보호계전기의 동작 상태, 부하상태, 계통의 실상 등을 조사하여 참고



로 하는 동시에 외부에서 전기적 시험, 유중 가스 분석, 절연시험, 절연유시험 등으로 종합적인 진단을 하여 고장장소, 고장의 정도를 어느 정도 예측하는 것은 고장의 점검, 수리, 복구를 원활하게 하는데 극히 중요하다.

(1) 전기적 시험에 의한 권선고장의 진단

(a) 절연저항 측정

접지계전기의 동작에 의하여 접지가 되고 있는지 여부가 명확한 경우도 있는데 변압기 단자를 모선에서 격리시키고 각 권선의 대지간 및 권선간의 절연저항을 측정하여 주절연의 파괴여부를 판

정할 수 있다. 접지 또는 권선간이 혼촉되어 있으면 절연저항은 0Ω이 된다. 정상적인 변압기의 허용 절연저항치의 기준을 그림 2에 들었다. 또한 측정시의 접속을 그림 3에 들었다.

(b) 권선의 도통, 권선저항의 측정

권선의 도통을 체크하여 간단하게 단선 유무를 확인할 수가 있다. 단, 권선이 병렬로 접속되어 있거나 3상변압기로 3각(Δ) 결선인 경우 그 저항치를 측정하지 않으면 단선의 유무는 확인할 수 없다. 또한 저항측정에서는 단선 판정 외에 층간단락의 판정도 할 수 있다.

변압기의 저압측 저항은 매우 작고 또한 현장 측정은 대체로 오차가 크므로 적절한 판정자료로 하기가 곤란한 경우가 있다.

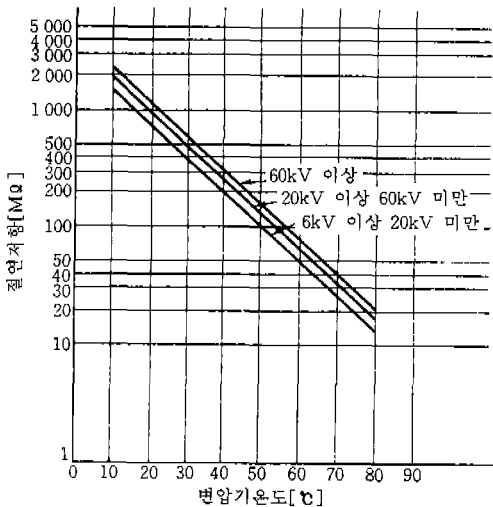
(c) 전압비의 측정

층간 단락 또는 권선간 단락을 판정하기 위해 200V 정도의 전원으로 전압비를 조사하는 것은 효과적이다.

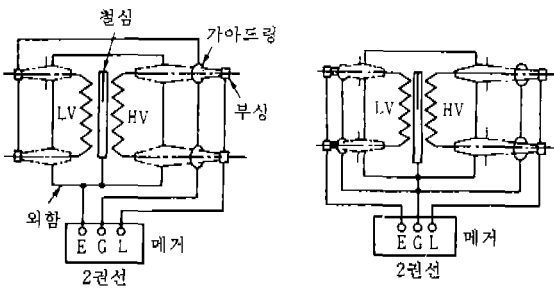
현지의 측정은 전원전압의 변동 등으로 오차가 크다는 데 유의한다. 한편 입력측에 전류계(밀리언 미터)를 접속해 주면 단락 유무의 판정에 도움이 된다. 그림 4에 측정회로의 일례를 들었다. 단락이 없는 경우의 전류치는 변압기의 전압, 용량 등에 따라 다른데 통상 수 10mA이다.

(d) 여자전류의 측정

정격전압의 1/10~1/3 정도의 전압을 인가하여 여자전류를 측정하고 이것이 공장시험의 여자특성

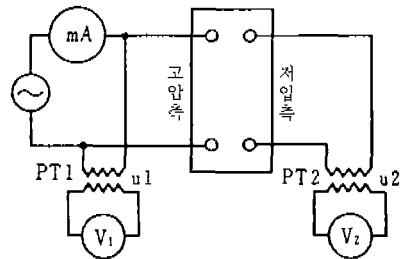


<그림 2> 변압기의 절연저항 허용치



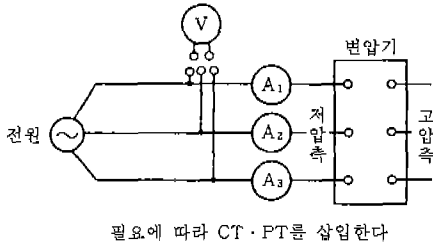
(a) HV-E의 경우 LV-E도 동일 (b) HV-LV의 경우

<그림 3> 절연저항 측정 접속도

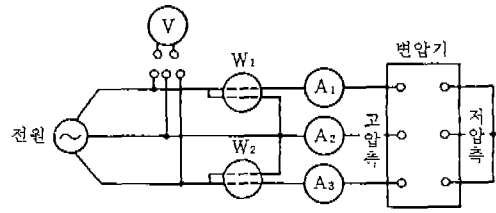


$$\text{구하는 변압비 } n = \frac{n_1 V_1}{n_2 V_2}$$

<그림 4> 전압비 측정 접속도



필요에 따라 CT·PT를 삽입한다
 <그림 5> 여자전류 측정회로도



<그림 6> 임피던스 측정회로도

의 전압-전류곡선상에 있는지의 여부를 조사한다. 인가전압을 변화시켜 여러 점의 여자전류를 측정하는 것이 좋다. 만일 여자전류가 대폭적으로 증가되고 있으면 권선의 층간단락의 발생을 생각할 수 있다. 측정점속도의 일례를 그림 5에 들었다.

(e) 임피던스 전압의 측정

변압기 내부 또는 외부의 단락사고로 인한 단락 전류의 반복에 의하여 권선이 변형되는 수가 있다. 이 경우 각 권선간의 상호의 위치관계가 변화하여 변압기 임피던스에 변화를 가져오므로 이것을 측정하여 공장의 시험 데이터와 비교한다. 현지에서는 전원용량의 관계로 정격전류를 흐르게 하고 측정하기가 곤란한데 저전압, 소용량전원에서 상당한 정밀도로 측정할 수 있다. 측정회로의 일례를 그림 6에 들었다.

(f) 유전정접(tan δ) 시험 (2)의 (b) 참조.

(2) 절연열화의 진단

변압기는 장기간 사용하면 사용되고 있는 유기 절연재료에 열화현상이 나타난다. 이것은 열에 의한 열화가 주요 원인이다. 변압기의 절연열화 판정은 일반적으로

- (i) 절연저항 측정
- (ii) 유전정접(tan δ) 측정
- (iii) 흡수전류 측정

등이 실시된다.

(a) 절연저항 측정

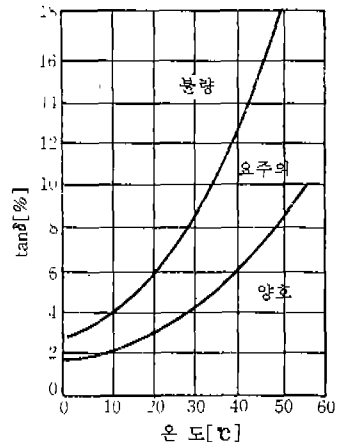
절연열화 진단의 하나로서 절연저항을 측정한다. 그러나 이것은 열화의 경향을 파악하는 하나

의 요소는 되어도 저항치 그 자체를 판단할 수는 없다. 그러나 절연저항은 흡습에 매우 민감하므로 절연물의 흡습 정도를 아는 기준이 되며 그 허용치는 그림 2와 같다.

(b) 유전정접(tan δ)의 측정

유전정접(tan δ)의 값은 전반적인 절연물의 흡습 정도와 열화도를 판정하는 데 효과적이다. tan δ의 값은 기기의 절연 구성에 따라 다르며, 어떤 절연 구성에서는 흡습도, 온도, 전압에 따라 변화한다.

일반적으로 절연이 흡습되거나 온도가 높아지면 tan δ값은 높아진다. 또한 인가전압이 높아지면 tan δ값이 높아지는데 이것은 코로나 방전에 기인하는 것으로, 유입변압기의 경우 정격전압 이하의 전압에서의 변화는 적다. 유압변압기의 tan δ에 의한 흡습도, 절연열화의 판정기준으로서 Gross씨의 제안에 의한 그림 7이 일반적으로 사용되고 있다. 주의를 요하는 영역의 것은 양호한 것에 대하여



<그림 7> 변압기의 tan δ에 의한 열화 판정기준



어느 정도 흡습되어 있는데, 그대로 사용해도 지장이 없다. 불량영역의 것은 더욱 흡습도가 높은 것으로 기름 교체, 권선 건조가 필요하다.

$\tan \delta$ 의 측정에는 간이형 세링브리지, $\tan \delta$ 계 등이 있다.

(c) 흡수전류의 측정

직류고전압을 인가하여 전류시 시간관계를 측정하여 절연상태를 판정하는 방법으로 신폴 납입시의 값과 비교하여 판정하는 것이다. 절연열화가 진행됨에 따라 흡수 전류는 증가된다. 측정은 일반적으로 초절연 저항계가 사용되는데 유도에 주의할 요한다.

(3) 절연유의 열화진단

절연유는 철심과 권선, 권선 상호간, 충전부 접지간의 절연을 유지하며, 철심 및 권선 내 등에 발생한 열을 방산하기 위한 냉각 모체라는 두가지의 중요한 사명을 가지고 있다. 어느 기능이 저하되어도 이에 기인하여 발생하는 사고는 절연과피나 소손이라는 중대한 사고도 발전할 위험성이 있다. 따라서 절연유의 열화를 진단하는 것도 예방적인 고장진단으로서 의의가 크다고 하겠다.

(4) 유중 가스 분석

운전중의 변압기 사고를 미연에 방지하기 위해 기기 내부의 이상징후의 조기발견 및 사고시의 기기 내부상태의 신속한 파악을 목적으로 하여 유중 가스 분석이 최근 주목되고 있다.

(5) 내부점검에 의한 진단

외부에서의 진단에 의하여 변압기 내부의 고장부분 또는 열화부분이 추정된 경우에는 그 확인을 위해 내부점검을 한다. 중소형 변압기인 경우에는 일반적으로 내부를 용이하게 들어 올릴 수 있는 구조로 되어 있으므로 들어 올려 세부적으로 점검할 수가 있다. 대형 변압기로 현지에 설비되어 있는 것으로, 들어 올릴 수가 없는 경우에는 기름을

필요한 만큼 빼고 맨홀에서 내부로 들어가 점검을 한다. 점검은 하루에 끝나도록 미리 충분히 준비하여 내부를 공기 중에 방치하는 시간을 짧게 하며, 2일간에 걸치게 되는 경우에는 야간에는 권선을 유중으로 되돌려 놓고 흡습을 피하도록 주의해야 된다.

내부 점검시의 주의사항은 다음과 같다.

(a) 권선관계

- (i) 권선, 절연물의 손상 유무
- (ii) 코일의 변형, 균열 유무
- (iii) 코일의 삽입, 볼트 잠부의 이완 유무
- (iv) 방전 흔적 유무

(b) 철심 관계

- (i) 철심 썸 볼트의 절연저항 측정
- (ii) 철심의 접지는 완전한지 여부
- (iii) 철심의 정확한 위치, 변형 유무
- (iv) 철심의 과열 흔적 유무

(c) 기 타

- (i) 탭 전환기 접촉자부의 방전, 과열흔적 유무
- (ii) 절연물의 변색과 탄화(炭化)의 유무
- (iii) 동분, 철분, 기타 이물 유무
- (iv) 자화동, 자화은의 생성 유무

6. 절연유 열화의 진단

(1) 절연유의 열화

절연유의 열화는 공기중의 수분 흡수나 불순물 흡입에도 기인되지만 최대의 요인은 절연유가 고온에서 공기와 접촉하여 발생하는 산화현상이다. 이 산화는 변압기의 온도상승, 동, 철 등의 금속의 접촉작용, 절연 와니스의 용출 등에 의하여 더욱 촉진된다. 이 산화가 더욱 진행되면 분해중합 등의 화학반응이 생겨 기름에는 잘 녹지 않는 (스러지라고 한다) 물질을 생성하여 이것이 철심이나 권선, 방열기 등에 침적 부착, 냉각을 방해하여 절

〈표 6〉 절연유 산가의 판정기준

판정	산가[mg KOH/g]
양호	0.2 미만
요주의(가급적 재생 또는 교체한다)	0.2~0.5
불량(조속히 재생 또는 교체한다)	0.5 초과

연 열화에 크게 영향을 미친다.

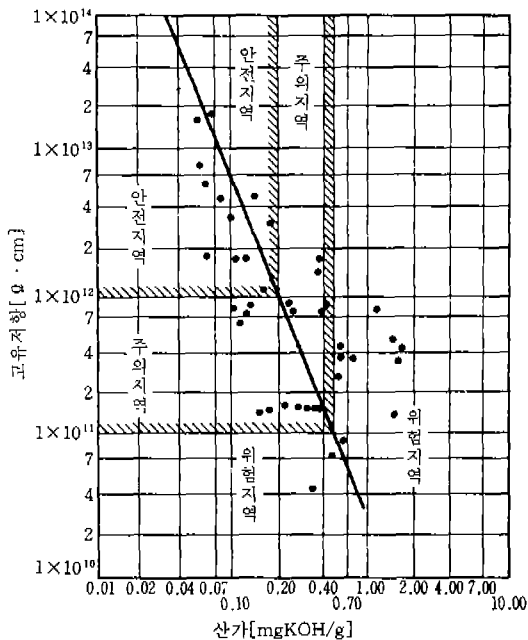
(2) 절연유의 열화판정

절연유의 열화판정법으로는 일반적으로 측정이 간단한 절연파괴전압의 측정이 실시되는데 산화도, 고유저항, $\tan\delta$, 계면장력 등을 측정하여 종합적으로 열화도를 판정하도록 한다.

(a) 산화의 측정

산화 0.2mg KOH/g 정도까지는 슬러지의 발생은 거의 없으며 점차 진행하여 0.4mg KOH/g 정도가 되면 슬러지의 발생이 시작되며 그 이상이 되면 급속히 진행된다.

절연유의 재생 또는 새로운 기름과 교환하는 기준은 표 6과 같이 하며 0.5mg KOH/g를 초과하는



〈그림 8〉 절연유의 산가와 고유저항과의 관계

〈표 7〉 절연유 수분과 고유저항의 판정기준

판정 항목	유중수분량[ppm]	고유저항치[Ω·cm]
양호	35 이하	1×10^{12} 초과
요주의	35~50	$1 \times 10^{11} \sim 1 \times 10^{12}$
불량	50 이상	1×10^{11} 미만

경우에는 조속히 재생 또는 교체해야 된다.

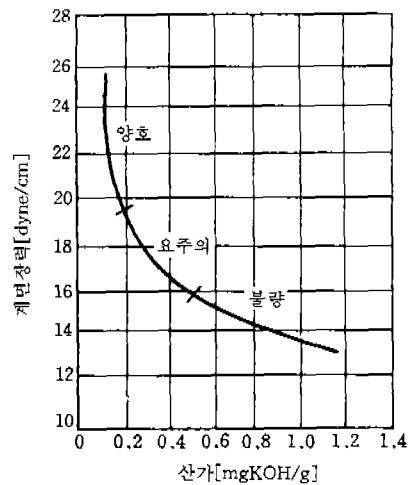
(b) 고유저항의 측정

절연유의 고유저항은 변압기의 절연에 직접적으로 관계가 되며 변압기의 절연저항치에 크게 영향을 미친다. 그림 8에 절연유의 산화와 고유저항과의 관계의 일례를 들었다. 또한 표 7에 절연유 중 수분과 고유저항의 판정기준을 들었다.

(c) 계면 장력의 측정

절연유의 열화정도를 본질적으로 조사하는 방법으로 계면 장력을 측정한다. 산화 초기에 계면 장력의 저하가 현저하고 산화가 진행됨에 따라 더욱 저하한다. 그림 9에 계면 장력과 산화관계의 일례를 들고 표 8에 그 판정기준을 들었다. 이 측정은 슬러지의 발생에 예민한 반응을 나타내므로 열화 판정에 가장 적합한 방법이지만 측정이 약간 어렵다.

(d) 절연유 파괴전압의 측정



〈그림 9〉 절연유의 산가와 계면장력과의 관계



<표 8> 절연유 계면장력의 판정기준

판 정	계면장력(dyne/cm)
양 호	19 초과
요 주의 (슬러지가 석출되는 수가 있다)	16~19
불 량 (반드시 슬러지가 석출된다)	16 미만

<표 9> 절연유 절연파괴전압의 판정기준

판 정	절연파괴전압[kV]
양 호	30 초과
요 주의	30~25
불 량	25미만

절연유의 파괴전압 저하는 직접 변압기의 내전압 저하로 나타난다. KS C 2301(전기절연유)에서는 절연 파괴전압치가 30kV 이상으로 되어 있는데 새 기름인 경우 보통 50kV 이상이며 처리, 보수를 충분히 하면 40~50kV 정도로 유지할 수가 있다. 전압이 높은 변압기일수록 절연유의 내전압을 크게 유지해야 된다. 파괴전압치는 유종의 수분 및 불순물의 존재에 따라 크게 좌우되므로 절연 파괴전압치만으로 열화를 판정하는 것은 곤란한데 표 9에 그 판정기준을 들었다.

7. 절연유종 가스 분석에 의한 이상 진단

변압기 내부에서 고장이 발생하여 국부적인 이상 과열이 생기면 기름이나 절연지 등의 절연물이 열에 의해 열화, 분해되어 H₂, CO, CO₂나 저분자량의 탄화수소를 발생한다. 이같은 가스는 절연유에의 포화용해도가 크고 상당한 양이 절연유중에 용해된다. 유종 가스 분석에 의한 이상진단은 이같이 용해된 가스를 질량분석기나 가스크로메트 그래프 등으로 분석하여 가스 성분과 발생량, 경년적변화 등을 조사하여 고장의 종류, 장소, 정도 등을 판정하는 것이다.

이 방법은 전기적 시험으로 판정이 곤란한 경고장, 철심 국부사고 등의 판정에 유효하며 완만하게 진행되는 사고도 초기단계에서 발견할 수 있다는 특징이 있다. 그러나 절연 파괴 등의 돌발적인

<표 10> 이상의 종류와 발생 가스의 성분

이상의 종류 가스의 종류	절연유의 과 열	고체절연물 과 열	유종아크 분 해	고체절연물 아크분해
수소(H ₂)	○	○	◎	◎
메탄(CH ₄)	◎	◎	○	○
에탄(C ₂ H ₆)	○	○	—	—
에틸렌(C ₂ H ₄)	◎	◎	○	○
아세틸렌(C ₂ H ₂)	—	—	◎	◎
프로필렌(C ₃ H ₆)	◎	○	○	○
프로판(C ₃ H ₈)	○	○	—	—
일산화탄소(CO)	—	◎	—	◎
탄산가스(CO ₂)	—	◎	—	◎

주. ◎표는 그 이상에 대한 특징적인 발생 가스를 표시

사고를 사전에 판정하는 것은 현시점에서는 곤란하다.

(1) 유종 가스 분석의 방법

유종의 가스 분석방법은 다음과 같은 순서로 실시한다.

- (i) 절연유 채취 : 변압기의 하부 배유 밸브에서 채유하는데 채유시에는 가급적 기름이 공기와 접촉하지 않도록 배려한다.
- (ii) 용존 가스의 추출 : 테프러 펌프식, 트리체리 진공식 등이 일반적으로 채용되고 있다.
- (iii) 용존 가스의 분석 : 가스크로메트 그래프가 일반적으로 채용되고 있다.
- (iv) 이상의 판단과 진단 :
 - 판정 : 변압기 내부의 이상 유무를 판단한다.
 - 진단 : 변압기 내부이상의 종류, 장소, 정도를 추정한다.

(2) 분석대상 가스

변압기 내부사고로 사고가 발생하는 요인은

- (i) 절연유의 과열
- (ii) 유종 아크 분해
- (iii) 고체 절연물의 과열
- (iv) 고체 절연물의 아크 분해

<표 11> 가연성 가스량에 의한 이상판정 기준

항 목		판 정	요주의	이 상
가연성 가스	10MVA 이상	1,000ppm 이상	2,000ppm 이상	
총량	10MVA 초과	700ppm 이상	1,400ppm 이상	
가연성 가스	10MVA 이하	350ppm/연	100ppm/연	
총량 증가경향	10MVA 초과	250ppm/연	70ppm/연	
아세틸렌(C ₂ H ₂)가스			—	미량이라도 검출되었을 때

(주) 가연성 가스란 H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂, CO를 포함한다.

등을 생각할 수 있다. 일반적으로 이같은 이상현상에 의한 발생가스는 표 10과 같다.

변압기의 유중 가스 분석은 일반적으로 다음 9 종류의 가스 대상으로 되어 있다. 즉 O₂, N₂, H₂, CO, CO₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂이며 주로 정상, 이상을 판정하는 성분으로서 H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂의 가연성 가스가, 또한 절연물의 열화를 판정하는 성분으로서 CO, CO₂, CH₄가 사용된다.

(3) 이상의 판정

이상 판정은 가스 분석결과에서 변압기 내부의 이상 유무를 판단하는 것이며 그 일반적인 방법으로는

- (i) 가연성 가스의 발생총량에 의한 판정
- (ii) 각 가연성 가스 성분량에 의한 판정
- (iii) 가연성 가스의 증가속도에 의한 판정
- (iv) 가연성 가스 성분 패턴 변화에 의한 판정

등이 있다. (i), (ii)는 어떤 한 점에서의 측정 데이터로 판정할 수 있는데 (iii), (iv)의 경우는 측정 데이터의 경년 변화에서 판단하는 것으로, 과거의 누적 데이터가 필요하다.

이상의 판정기준은 변압기 각각의 전압, 용량, 유열화방지방식, 운전경력에 따라 서로 다르고 해당 변압기의 가스 분석결과에서 어떻게 판정하는가는 매우 어려운 문제로, 현재 유중 가스 분석 결과의 수치적인 판정기준은 아직 명확한 것이 발표된 것이 없는데 판정기준의 일반적인 기준으로서 표 11의 적용이 가능하다. 요주의 기준 미만은 이상이 없는 것이고 요주의 기준 이상~이상기준 미만의 경우는 주의를 요한다.

C₂H₂의 발생은 아크 등 매우 고온의 이상부가 있는 것으로 생각되며 사고의 진전이 빠른 것으로 판단되므로 조속히 다른 진단방법도 포함하여 내부 진단을 해야 된다.

요주의의 경우에는 가스 분석에 의한 추적조사, 기타의 방법으로 내부 이상을 조사한다.

(4) 이상의 진단

유중 가스 분석의 결과로 변압기 내부의 이상의 종류(아크 방전, 과열, 부분방전), 양상을 추정하는 방법으로서

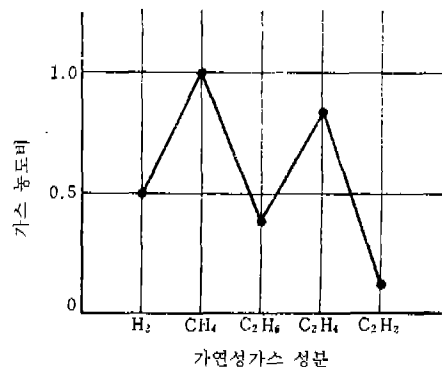
- (i) 생성 가스의 종류에 중점을 둔 방법
예 : LCIE법
- (ii) 성분, 가스량의 비에서 추정하는 방법
예 : 가스패턴법, IEC법, Rogers법 등
- (iii) 특정 가스에 의한 방법

등이 있는데 여기서는 가스패턴법, IEC법, 특정가스에 의한 방법의 일반적인 것에 대하여 극히 간단히 설명한다.

(a) 가스패턴에 의한 진단법

가스패턴에 의한 진단법은 횡축에 가연성 가스, H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂의 성분 가스를, 종축에 각 성분가스의 농도화(최대의 것을 1로 한다)를 플로트하여 가스 패턴을 그리고 그 형상에 따라 이상의 내용을 진단하는 것이다. 가스패턴도의 일례를 그림 10에 들었다.

가스패턴에 의한 진단기준도 아직 확고한 것은



<그림 10> 가스패턴(점속불량으로 인한 과열 예)



〈표 12〉 가스패턴의 특징과 내부사고와의 관계

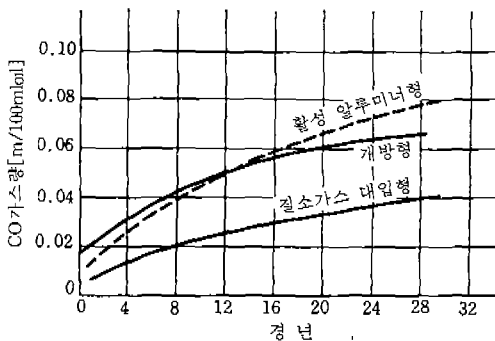
농도배가인 가스	이상의 현상	구체적인 사고에
H ₂ 의 경우	아크 방전 코로나 방전	권선의 총간 단락 권선의 용단 탭 전환기 접점의 아크 단락
CH ₄ 또는 C ₂ H ₄ 의 경우	과열 접촉 불량 부성전류에 의한 과열	컬부의 이완 전환기 접점의 접촉 불량 절연 불량
C ₂ H ₂ 의 경우	아크 방전	H ₂ 의 경우와 같다

없는데 일반적으로 가스패턴의 특징과 내부사고와의 관계는 표 12와 같다. 모두 현상에서는 가스패턴에 의하여 정기적인 현상판단은 할 수 있어도 사고의 양상을 상세히 판단하는 것을 어렵다.

(b) 특정 가스에 의한 진단법

(i) CO, CO₂ 가스에 의한 진단 절연유중의 고체절연물이 과열되면 특징적인 가스로서 CO, CO₂가 발생하는 것은 표 10과 같다. 그러나 이 CO, CO₂에 대해서는 고체절연물의 이상과열 외에 그림 11, 그림 12와 같이 경년열화에 의해서도 발생하기 때문에 이것을 고려하여 진단해야 된다. 진단기준은 기름의 열화방지방식, 운전 연수 등을 고려하여 표 11, 표 12의 값을 크게 초과한 경우에는 절연지, 베이클라이트 등의 고체절연물의 소손 가능성이 있다.

(ii) C₂H₂ 가스에 의한 진단 C₂H₂는 유증 아크등의 고온 열분해에서 다량으로 발생하는 특징적인 가스이다. 보호계전기가



〈그림 11〉 일산화탄소 가스량의 판정기준

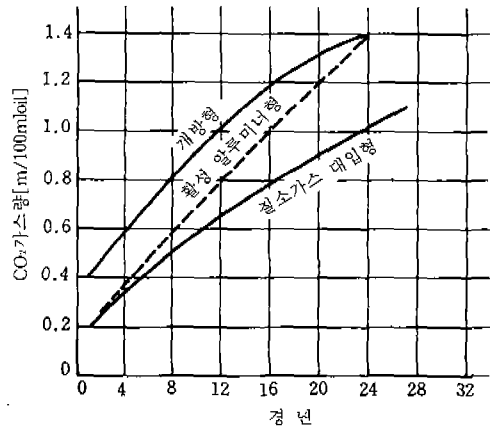
동작하고 또한 유증 가스중에 C₂H₂가 다량으로 검출되면 권선의 총간단락 등의 유증 아크에 의한 중대한 사고를 의미한다. 또한 코로나 방전의 경우 C₂H₂를 발생하는데 아크 방전보다 에너지가 작기 때문에 발생 가스량은 적다. 또한 접촉불량 등의 국부과열에서도 파생적으로 C₂H₂가 검출되는 일이 있는데, 이 경우 C₂H₂의 최대 가연성 가스에 대한 비율을 수% 이하이다.

(c) ICE법

아직 정식으로 발표된 것은 아닌데 H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂의 가연성 가스에 대하여 C₂H₂/C₂H₄, CH₄/H₂, 및 C₂H₄/C₂H₆의 3종류의 비의 값에 각각 코드를 붙이고 그 코드의 구성에 의하여 경년열화를 포함한 8종류의 불량현상 정도로 분류하여 판단하는 것이다.

8. 맺음말

이상 변압기의 외부, 내부사고의 진단에 대하여 해설했는데 열화의 판정 및 진단결과 판정기준에 정성적인 설명에 그치고 정량적으로 구체적인 수치를 표시하지 못한 것이 많으며 현장에서 실제로 활용하는데 있어서 판정이 곤란한 점이 많을



〈그림 12〉 탄산 가스량의 판정기준

