

절연유중 용존 수소가스 분석에 의한 변압기의 내부이상 진단기술

남 창 현

한전 기술연구원 전력연구실 운할 및 절연유 연구팀

1. 서 론

최근 전력공급의 질적인 향상 요청으로 전력 설비의 안정성에 대한 요구가 날로 증대되고 있으며, 특히 변압기의 신뢰성 향상과 사고의 미연방지를 위한 예방 또는 예측진단기술의 중요성이 크게 인식 되고 있는 실정이다.

변압기는 운전중에 각부가 열화등으로 전기, 기계적인 성능이 저하되어 이상이 발생하는 경우가 있는데, 그 이상을 사전에 검지하여 적절한 조치를 취하지 않으면 중대한 사고를 일으키는 수가 있다. 이러한 사고를 미연에 방지하기 위해서는 이상의 징후를 초기단계에 검출하여 이상의 내용을 정확히 파악하고 대책을 수립할 필요가 있다. 이러한 이상유무를 진단하는 많은 방법들이 실용화 되어 있는데, 변압기와 같은 유입기기의 이상진단 방법중 가장 효과적인 보수관리법으로서 유중가스 분석에 의한 방법들을 수 있으며, 국내외의 여러 전력회사에서 채용하여 사고예방에 크게 기여하고 있는 것으로 조사되어 있다.

변압기 내부의 이상현상, 즉 절연파괴현상이나 국부과열현상은 반드시 발열을 동반하며 발생이 되는데, 이러한 발열원에 접촉한 절연유, 절연지 및 bakelite등의 절연재료는 열의 영향으로 분해반응을 일으켜 CO₂, CO, H₂, C₂H₂, CH₄, C₂H₄ 등과 같은 탄산수소계 가스를 발생시킨다. 이 발생가스의 대부분은 절연유중에 용해되기 때문에 변압기에서 채취한 절연유중의 용존가스를 추출하고 분석하여 얻은 가스량 및 가스 조성으로 부터 변압기의 내부이상 유무 및 부위와 그 정도를 추정할 수 있다.

최근 분석작업의 간소화와 신속화의 목적으로 변압기의 이상유무를 진단하는 「자동 유중가스

분석장치」가 개발되어 실용화 되고 있다. 이 장치는 변압기에 취부하여 자동, 연속적으로 변압기의 내부상태를 알려주고 경보를 울리게 하여 사고를 사전에 예방토록 설계하고 있으며, 또한 변전설비의 종합 진단시스템과 연계시킬 경우 변전소 무인화에 대처할 수 있도록 시스템 구성하고 있다.

따라서 본 관에서는 유중 용존가스 분석에 의한 변압기의 일반적인 내부이상 수소가스에 의한 진단법에 대해서 그 진단기술의 이론적 근거와 진단장치의 구성 등을 중심으로 기술하고자 한다.

2. 유중 용존가스 분석에 의한 변압기의 진단기술

2-1. 열분해 가스의 발생

변압기 등과 같은 유입전력기기의 보수관리법으로서 절연유중 용존가스 분석법이 사용된 것은 1960년초로 알려져 있다. 고전압 유입 전력기기 내부에서 운전중에 접촉불량, 국부과열, 부분방전 또는 arc방전등의 이상이 발생하는 경우, 기기 내부의 절연유나 고체절연물이 열분해하여 가연성가스를 절연유 중에 확산, 용해시

표 1. 이상의 종류에 의한 발생가스 성분

이상의 종류	주요 발생 가스
절연유의 과열	H ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆ , C ₃ H ₆ , C ₃ H ₈
고체절연물의 과열	H ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆ , C ₃ H ₆ , C ₃ H ₈ , CO, CO ₂
절연유중의 방전	H ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₂ , C ₃ H ₆
고체절연물의 방전	H ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₂ , C ₃ H ₆ , CO, CO ₂

(주) _ 은 특징가스를 나타냄.

표 2. 230~600°C 의 국부가열에 의한 절연유의 분해가스

(X10cc/1g oil)

가열온도	230°C	300°C	400°C	500°C	600°C
가스종류					
CH ₄	-	-	0.42	42.58	58.48
C ₂ H ₆	-	-	-	0.45	26.01
C ₂ H ₄	-	-	-	0.17	32.47
C ₃ H ₈	-	-	0.42	1.18	2.08
i-C ₄ H ₁₀	-	-	0.55	3.26	6.97
C ₂ H ₂	-	-	-	-	-
H ₂	-	-	-	1.52	3.20
CO ₂	0.17	0.22	2.19	0.67	0.28
기 타	-	-	-	0.96	2.25

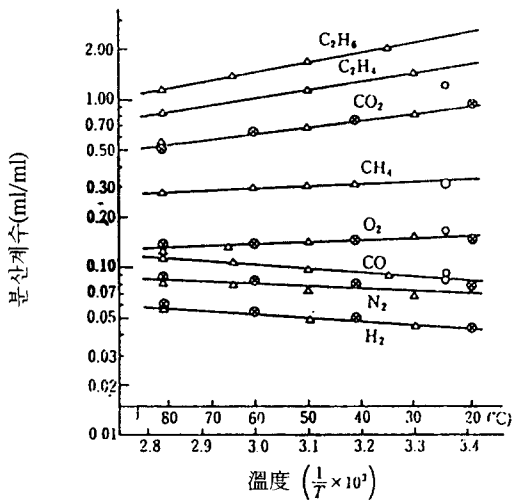


그림 1. 분산계수와 온도의 관계

킨다. 이상의 종류에 따른 주요 열분해 가스를 다음의 표 1에 나타내었다.

이상의 내용에 따라 발생가스의 종류가 다른 것은 이상발생부의 재료 및 과열에 의한 온도가 서로 상이한데 기인하는 것이다.

절연유의 열분해에 의한 가스의 발생량과 가열온도와의 관계 일례를 표 2에 나타내었으나, 각 온도조건에 의한 발생가스의 종류와 발생량이 현저하게 다르다는 것을 알 수 있다.

2-2. 유중 gas와 진단원리

가. 유중 용해가스량

절연유중에는 가스가 용해되어 있는데, 그

용해량은 가스의 종류와 가스의 압력, 절연유의 온도 등에 따라 결정된다.

유입변압기의 내부에 이상이 발생되어 절연유 또는 고체절연물이 열분해되어 가스가 발생하는 경우, 그 가스는 절연유중에 용해한다. 절연유중에 용해하는 가스량은 가스의 압력에 비례 (Henry's law)하며, 동시에 분산계수에도 비례한다. 분산계수는 유면상의 가스압이 1kgf/cm² 일 때 1ml의 油에 대한 가스의 포화용해량의 체적을 표준상태(0°C, 1 kgf/cm²) 로 환산한 것이다. 다음 그림은 분산계수와 온도와의 관계를 나타낸 것이다.

나. 가스의 유중 용해와 확산

절연유중에 용해되어 있는 가스량은 유면상의 가스압과 평형을 유지하는 방향으로 변화하며, 그 평행조건은 다음 식으로 표시된다.

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

여기서,

P(kgf/cm²) : 유면상의 가스분압

P⁰(kgf/cm²): 대기압(kgf/cm²)

VL(ml/ml) : 油 1 ml중의 용해가스량 (표준상태, ml)

k(ml/ml) : 분산계수

이며

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

표 3. 판정기준 및 분석주기 (한전)

(단위:ppm)

구 분	정 상	요 주의	이 상	위 령
H ₂		400 이상	800 이상	
CO		300 이상	800 이상	
C ₂ H ₂		20 이상	100 이상	
CH ₄		250 이상	750 이상	
C ₂ H ₆		250 이상	750 이상	
C ₂ H ₄		250 이상	750 이상	
CO ₂		4000 이상	7000 이상	
T. C. G.		700 이상	1800 이상	
경시증가량		250/년 이상	100/월 이상	300/월 이상
분석주기	1 회/년	추적조사 1회/3~개월	추적조사 1회/1~2개월	내부점검 실시

※ T. C. G.는 O₂, N₂, CO₂ 가스를 제외한 가연성가스의 총량임.

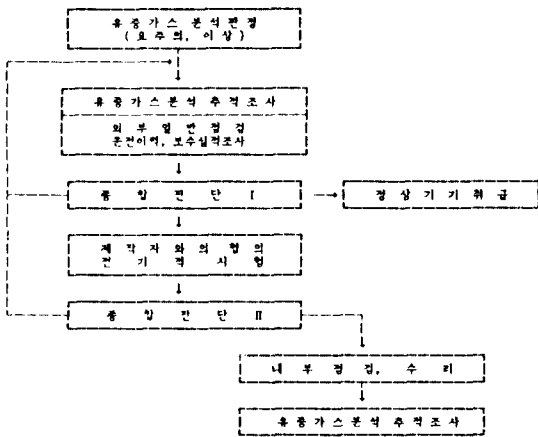


그림 2. 종합진단 기술의 일례

일 때, 가스는 油中으로 용해하며,

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

일때, 가스는 유중에서 유면상의 공간으로 확산하게 된다. 다만, 이와 같은 가스의 용해, 확산은 순간적으로 행해지지 않고 상당한 시간을 가지고 진행된다.

다. 유중 가스의 추출

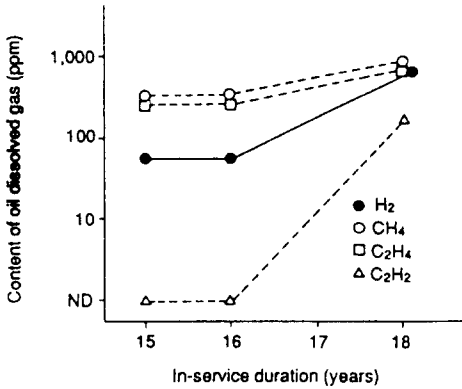
절연유를 진공중에 방치시키면 油중에 용해되어 있는 가스는 진공중에 확산하게 된다. 이 가스를 정량하고 채취하여 분석한다. 가스의 추출방법으로서는 몇가지의 방법이 실용화 되어 있다. 많이 이용되고 있는 방법은 아래와 같다.

- ① 토리첼리 방식
- ② 토폴러 펌프 방식
- ③ Piston 방식
- ④ Bellows 방식

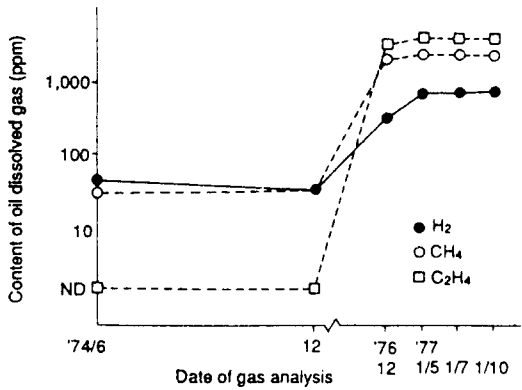
이밖에 용도에 따라서 격막방식, bubbling 방식 등의 추출방식들이 있다.

라. 추출가스의 분석법

추출한 가스는 혼합가스이기 때문에 이것을 화학분석 장치를 이용하여 정량분석한다. 분석장치로서는 가스크로마토그래피가 많이 이용되고 있다. 일반적으로 분석대상가스로서는 O₂, N₂, H₂*, CH₄*, C₂H₆*, C₂H₄*, C₂H₂*, CO*, CO₂ 등의 9종류의 가스이다(*는 가연성가스를 표시한 것이다). 이와 같은 화학분석을 간단하면서도 쉽게 하기 위하여 가스의 추출부와 일체로 한 자동 분석장치 및 휴대용 분석장치 등이 실용화 단계에 있다.



(부분방전에 의한 사고 예)



(과열에 의한 사고 예)

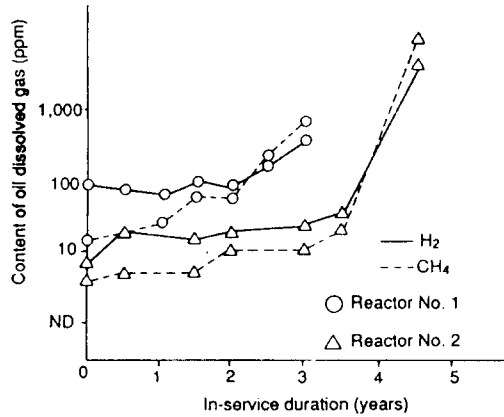
그림 3. 내부이상 변압기의 H₂가스와 가연성가스의 증가경향

2-3. 내부이상 진단의 판정기준

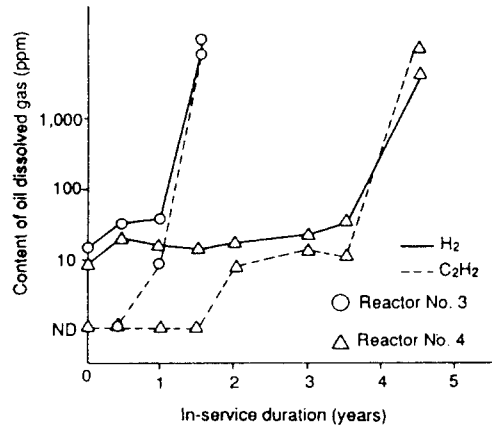
일반적으로 내부이상 진단은 특정 성분가스와 총 가연성가스의 량에 따라 결정된다. 각국 또는 각 전력회사마다 나름대로 그 판정기준을 자체 제정하여 사용해 오고 있는 것이 일반적이며, 현재 우리나라의 한전에서 적용해오고 있는 판정기준은 다음의 표 3과 같다.

2-4. 종합 진단기술

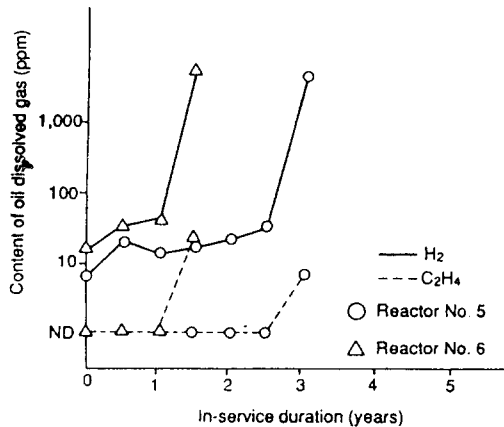
변압기 내부의 이상판정과 진단을 하는 경우, 유증 가스분석 결과로서 충분치 않는 경우 대상변압기의 운전경력 및 전기적 시험과 외부 일반점검 등의 유증가스 분석이외의 자료를 병행해서 검토하여 종합적으로 판단을 하는 것이



(H₂가스와 CH₄가스의 증가경향)



(H₂가스와 C₂H₂가스의 증가경향)



(H₂가스와 C₂H₄가스의 증가경향)

그림 4. 내부이상 변압기의 H₂가스와 기타 가스의 증가경향

필요하다. 이를 종합진단이라 일컫는다. 유증가스 분석에서 요주의 또는 이상으로 판정된 경우의 종합진단 일례를 그림 2에 나타내었다.

3. 유증 용존 수소가스 검지에 의한 진단기술

3-1. 진단기술의 근거

최근에는 이상진단을 보다 효과적으로 수행하기 위해서 변압기 내부에서 발생하는 용존가스 중 가장 특징적인 수소가스만을 연속적으로 측정하여 내부이상의 유무를 예측하는 진단기술이 실용화에 이르고 있다. 이러한 진단기술의

근거는 그림 3,4에서와 같이

- ① 내부이상시 수소가스는 다른 가스와 동반하여 필히 발생한다.
- ② 내부이상이 진전됨에 따라 발생하는 수소가스량은 비례적으로 증가경향을 보인다.
- ③ 기타 가스의 량이 증가할 때도 수소가스는 증가한다.

이상에서와 같이 수소가스는 내부이상 및 다른 가스와의 상관관계가 클 뿐만아니라, 절연유중의 용해도가 용존가스 중 가장 낮아서 때문에 추출이 쉽다는 등의 이유때문에 수소가스만의 단독 가스분석으로도 내부이상을 진단하는데 유용하게 적용되고 있다.

3-2. 진단절차

유증 용존수소가스에 의한 진단기술의 종합진단 절차는 그림 2와는 달리 1차진단과 2차진단으로 분류해서 진단의 효율성을 높이고 있는 것이 특징이다. 이는 앞서 기술한 바와 같이 분석작업의 간소화와 신속화를 목적으로 한 휴대용 또는 자동분석장치의 경우에 적용되는 종합진단으로서 현장 운전원 또는 변압기 본체에 설치된 분석장치로 분석된 용존 수소가스의 농도와 증가경향등을 관리기준에 의해 내부의 이상 유무를 판단하고(1차진단), 이상이 있을 것으로 추정되는 변압기에 대해서는 수소가스 이외의 용존가스를 정밀분석하여 이상의 유무 및 그 정도를 확인하는 종합진단의 절차를 취하고 있다(2차진단). 그 진단의 절차 예를 아래 그림 5에 나타내었으며, 진단기술의 적용에 대해서는

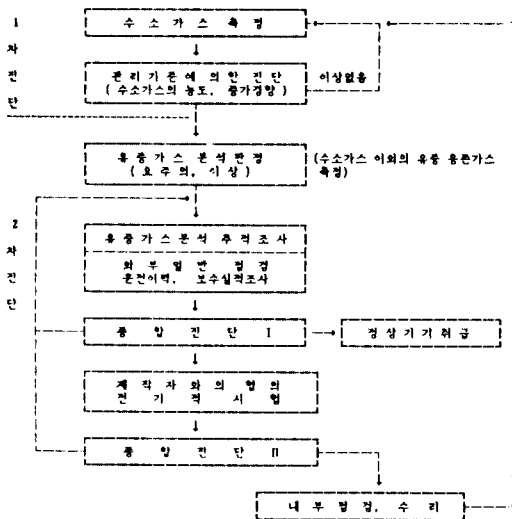





그림 5. 용존 수소가스 분석에 의한 내부이상 진단기술의 예

표 4. 진단기술의 적용

용도	대상	실시주기	실시방법	적용예	
				유증가스	접지선전류
1차진단 (이상의 징후 검출)	전변압기	상시	시스템화 (ON-LINE)	단일성분의 자동분석장치	동조법센서 +노이즈제거
		순시점검시	휴대장치화 (OFF-LINE)	단일성분의 분석테스터	동조법센서 +오실로스코프
2차진단 (정밀진단)	특정한 변압기 (요주의, 이상)	필요시	실험실적 분석	전 성분분석 이상판정 및 부위추정	확대역 CT +스펙트럼

표 5. 가스검지 방식

구분	원 리	기술수준	장 점	단 점
가스크로마토그래피 방식	 <p>Column 충전제 내를 통과한 가스의 이동 시간차를 검지</p>	실용단계	-실적이 많고, 기술이 확립 -대상가스가 많다.	-구조가 복잡 -고가
검지소자방식	 <p>① 반도체식 검지소자에 가스 흡착에 의한 저항 변화를 검지</p>	개발단계	-구조가 간단 -가격이 저렴	-대상가스가 단일 성분
	 <p>② 접촉연소식 검지소자 표면에 서의 가스연소를 저항변화로서 검지</p>			

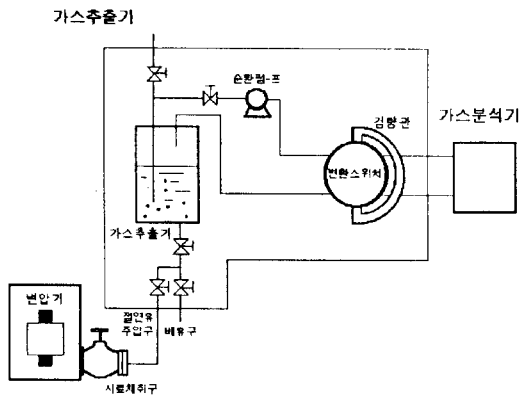


그림 6. 자동 수소가스 분석장치의 진단장치 구성 예

표 4에 나타내었다.

3-3. 유중 수소가스의 추출

유중 수소가스를 자동적으로 추출하는 간편한 방법으로서 고분자막의 가스투과성을 응용하는 격막방식과 유중에 공기를 불어 넣어 용존된 수소가스와 치환하여 추출하는 bubbling 방식이 있다. 격막방식은 별도의 시료채취가 불필요하고, 구조가 간단한 장점은 있으나, 추출시간이 길다는 단점이 있다. 이에 비해 bubbling 방식은 추출시간이 짧은 반면 추출후의 유가 공기포화되는 등의 단점을 가지고 있어 추출효율 등 성

능면에서 개선 연구가 필요한 방식이라 하겠다. 여기서는 이론적인 정립 및 실용화가 이루어진 격막방식에 대해서 보다 자세하게 서술하고자 한다.

이 방법은 특히, 수소와 같은 작은 분자는 투과성이 양호하고, 더구나 유지보수가 필요 없으며, 감시장치의 자동화 목적을 최대한 만족시켜 주는 방법이다. 고분자막에는 내열성이 우수한 polymeta film이 적절하며, polymeta film의 H₂가스투과성에 대해서는 이미 보고되어 있는 바와 같이 다음의 식으로 나타낼 수가 있다.

$$P_2 = (P_1 - P_0)(1 - e^{-(76PA/vd)t}) + P_0 \quad (1)$$

여기서, P₀: 투과측에서의 초기의 H₂가스 압력(CmHg) P₁: 피투과측에서 투과한 H₂가스의 압력(CmHg) P₂: 투과측에 투과된 H₂ 가스의 압력(CmHg) P: 투과계수(ml.cm/cm².s.CmHg) A: 막의 면적(cm²)V: 투과측 용기의 용적(cm³) d: 막의 두께(cm) t: 투과시간(s)

또 실제로는 압력단위보다는 농도단위로 환산하여 나타내는 것이 편리하다. 유중 H₂가스 압력 P₁은 Henry's law에 따라 P₁=kv(여기서, k: 정수, v: 유중의 H₂농도)구하는 것이 가능하며, H₂ 가스를 ppm단위로 표시하면 다음과 같이 된다.

$$C = (1.3 \times 10^4 kv - C_0) \times (1 - e^{-(76PA)/vd}) + C_0 \quad (2)$$

여기서, C_0 : 투과측의 초기의 H_2 농도(ppm),
 C : 투과측의 H_2 농도

이 식을 이용하여 유중 H_2 가스의 막투과량은 경시변화를 계산한 예가 그림 4이다. 여기서, 25°C에서 H_2 가스의 polymeta 막에 대한 투과계수는 $1.0 \times 10^{-10} \text{ ml.cm/cm}^2 \cdot \text{s.CmHg}$, 정수 k 는 $1.38 \times 10^{-3} \text{ CmHg/ppm}$ 이다. 계산치와 실측치와는 잘 일치하며, 대략 유중 H_2 가스는 100시간 정도 동안에 막을 투과한 H_2 가스와 평형을 이루고 있고, 이 평형에 도달하는 시간은 (2)식에서와 같이 막의 면적과 투과계수가 클수록, 또 투과측의 용기가 적고, 막의 두께가 얇을수록 짧게 된다. 투과계수는 온도가 높을수록 커지게 된다.

3-4. 수소가스의 검지

검지방식 중 가스크로마토그래피방식은 column 충전제내를 투과한 가스의 이동시간차를 검지하는 방식으로서, 여러 성분의 가스를 높은 정밀도를 가지고 검지할 수 있으나, 구조가 복잡하다는 단점이 있다. 비교적 수소가스와 같은 단일 성분가스를 검지하고자 하는 경우 적용이 유리한 방식으로는 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 실용화가 되어 있다. 대표적인 가스검지방식은 표 5와 같다.

3-5. 진단장치의 구성

절연유중에 용해된 수소가스 농도를 분석하기 위한 시스템은 절연유로부터 가스를 추출하는 추출장치와 반도체 센서 등에 의해서 추출된 수소가스의 농도를 측정하는 검지방식 등의 주요부분으로 구성되어 있다. 자동가스 분석장치는 현장 설치형으로서 1차 진단을 목적으로 하여 추출방식은 진공탈기방식 또는 bubbling방식, 검지방식은 가스센서방식, 대상가스는 수소가스를 선정하여 시스템을 구성한다. 추출방식을

air bubbling방식으로 한 장치의 구성예를 그림 6에 나타 내었다.

4. 결 론

현재, 변압기의 보수관리에는 빈도의 차이가 있겠으나, 모든 변압기에 대해서 정기적으로 시료를 채취하여 가연성가스를 추출하고, 이 가스를 정성, 정량 분석하기 위하여 여러가지 복잡한 절차를 거쳐야 하는 등 과다한 인력 및 시간의 소요가 불가피한 실정이다. 이와 같은 문제점을 해결하고 보다 효과적으로 변압기의 내부이상을 진단하기 위해서는 완전 자동의 진단시스템을 구성하여 상시감시함으로써 이상현상을 사전에 예지하여 대형 사고로의 발전을 보다 효율적으로 막을 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. 月岡 淑郎 菅原 悽夫, "變壓器 油中水素 常時監視 裝置의 研究", 電氣學會論文誌, Vol.100-A, No.1, Jan, pp.9-16, 1980.
2. B. Fallou, "Detection of and Research for the Characteristics of an Incipient Fault from Analysis of Dissolved Gases in the Oil of an Insulation", Electa, No. 42, pp. 31-52, 1975.
3. E. Dornenberg and W. Strittmatter, "Monitoring Oil-cooled Transformers by Gas Analysis", Brown Boveri Rev, No. 5, pp. 238-247, 1969.
4. D.R. Stull et al, The Chemical Thermodynamics of Organic Compounds, John Wiley, pp. 235-386, 1969.
5. W.L. Nelson, Petroleum Refinery Engineering, McGraw Hill, pp. 744, 1969.
6. 山岡, "變壓器內 絶緣油의 異常現像에 따른 가스發生에 대하여", 電學誌, Vol. 82, No. 5, 1972.
7. 石井, 難波, "變壓器 絶緣材料의 經年劣化에 의한 發生 가스", 電學誌, Vol. 90, No. 5, 1970.
8. 白井, 下地, 石井, "絶緣油 熱分解의 熱力學的 考察", 電學論 A, Vol. 97, No. 7, 1977.
9. 白井, 石井, 牧野, "變壓器 絶緣油에서의 水素의 發生", 電學論 A, Vol. 96, No. 6, 1976.
10. 小松, 關本他, "變電所의 豫測保全 시스템", 電氣學會絶緣材料研究會, EIM-89-20, 1989.
11. 電氣協同研究會, "變電所 監視시스템", 電氣協同研究, 第42卷 第3號, 1987.
12. 小松, 關本他, "變壓器 油中가스 檢出裝置의 開發", 電氣學會全國大會, 平成元年, 1234.
13. 小松, 本多, "變壓器 油中가스 檢出裝置의 開發", 石油學會製品部 第9回 絶緣油分科會, 平成元年.