2002년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2002.7.10-12

변압기 진단용 유중가스분석법의 비교특성

선종호, 김광화
한국전기연구원

Comparision of analysis methods of dissolved gas in oil for transformer diag

J. H. Sun, K. H. Kim
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 유입식변압기 내부고장의 조기발견을 위하여 유중가스분석법이 가장 일반적으로 사용되고 있다. 본 연구에서는 변압기 내부이상의 종류에 따른 발생가스의 특성과 유중가스분석법으로 사용되고 있는 key gas법, Donenburg법, Rosers법, IEC법에 대한 특성을 비교분석하였다. 동일한 가스성분에 의해서도 각 진단법에 의한 진단결과가 다르고, 또한 진단결과가 발생하지 않는 경우가 발생하고 있으며, 고장원인이 2가지 이상으로 복합되어 있는 경우 모든 고장원인을 밝혀낼 수 없는 것으로 나타났다.

1. 서 론

전력설비중에서 중요한 역할을 담당하고 있는 유입식 변압기의 내부에 국부과열, 부분방전, 아크방전과 같은 이상이 발생하면 변압기는 최종적으로 절연파괴된다. 절연파괴시 유입식변압기의 특성상 폭발 및 보수기간의 장기화 등으로 다른 전력기기의 고장에 비해서 큰 손실을 초래하게 된다. 유입식변압기가 절연파괴와 같은 큰 고장에 도달하기 전에 고장을 발견하고 보수하기 위한 진단법에 대한 연구가 많이 수행되어 왔지만 그 중 유중가스분석법이 현재에도 가장 신뢰성있고 일반적으로 사용되고 있다.

유입식변압기의 주절연물로서 사용되고 있는 절연유와 셀룰로즈 절연지는 다양한 탄화수소(hydrocarbon)화합물로 구성되어 있다. 이러한 화합물에 어느정도 이상의 온도나 혹은 부분방전, 아크방전 등이 일어나면 이 때 가해진 에너지와 화합물을 구성하고 있는 각 분자들의 결합에너지 혹은 분해에너지 등에 따라서 여러 가지 가스들이 형성된다. 이 때 질량분석기나 가스크로마토그래피를 이용하여 형성된 가스의 종류나 구성비 등을 측정하면 고장의 원인을 밝힐 수 있다. 이러한 성질을 이용하여 가스분석의 초창기에는 key gas를 이용한 진단이 수행되었으며 유중가스 측정기술이 발전되면서 Dornenburg, Rogers, Duval 등은 유중가스분석을 통하여 변압기의 초기이상을 진단하기 위한 가스비분석법을 발표한바 있고, IEEE나 IEC 등에서도 가스비분석법을 이용한 유중가스진단법을 채택하여 사용하고 있다. 그러나 이러한 진단법 들은 사용되고 있는 가스조성비가 다르고, 동일한 가스량에 대해서 그 진단결과가 다른 경우가 있으며, 또 각 진단법마다 진단이 되지 않는 경우가 발생한다.

본 연구에서는 대표적인 유입식 변압기의 고장원인에 따른 유중가스 발생기구 및 종류를 정리하였고, 가스조성비법으로서 Dornenburg법, IEEE에서 사용되고 있는 Rogers법, 1999년도에 개정된 IEC법에 대한 특성비교를 실시하였으며, 비교결과에 따른 차의 원인을 검토하였다.

2. 유중가스발생

유입식변압기의 절연물은 크게 광유를 사용하는 절연유와 셀룰로즈를 사용하는 고체절연지로 분류할 수 있다. 절연유와 셀룰로즈는 분자구조식이 다르고 열분해특성이 다르기 때문에 분해가스종류도 다른 특성을 보인다. 일반적으로 유중가스분석으로부터 측정되는 가스종류는 CH4, C2H6, C2H4, C2H2, H2, CO2, CO, N2, O2등이며 앞의 4가지 CH계 가스는 주로 절연유인 광유의 분해가스이며, CO계 가스는 셀룰로즈, H2가스는 공통적으로 발생되는 가스이고 N2와 O2는 분해가스가 아닌 변압기내에 일반적으로 존재하는 가스이다. 다음은 두가지 절연물의 분해특성을 보이고 있다.

2.1 절연유의 분해가스

절연유내에서 발생하는 유중가스의 발생원인은 크게 부분방전이나 코로나, 열분해 혹은 과열, 아크의 3가지로 분류할 수 있으며, 각각의 에너지 차에 의해서 발생되는 가스의 종류도 달라지게 된다. 이상원인에 따라 절연유에서 발생하는 대표적인 분해가스를 도식적으로 나타내면 그림 1과 같다. 그림 1에서와 같이 코로나나 부분방전에 의해서 나타나는 주도가스는 H2이며, 스파킹은 CH4와 C2H6, 과열은 C2H4, 아크는 C2H2가 된다. 이와 같이 이상원인에 따라 나타나는 주도가스는 key가스에 의한 진단방법으로 사용된다.

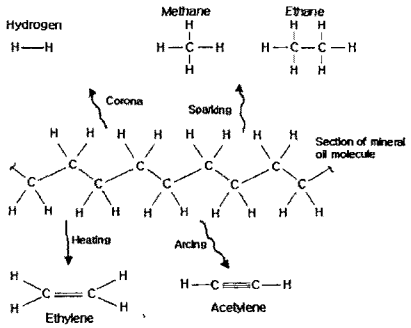


그림 1 절연유의 분해가스

2.2 셀룰로즈의 분해가스

고체 셀룰로즈는 그림 2에서와 같이 an hydro glucose ring과 C-O 분자결합으로 되어 있고 절연유온도보다 훨씬 낮은 온도에서 열적분해가 시작되어 정상적인 운전온도에서도 분해가스성분이 발견되며, 105℃ 이상의 온도에서 큰 고분자 절단율을 보이며, 300℃ 이상에서 완전한 분해와 탄화가 발생한다. 분해가스양은 온도에 지수함수적으로 비례하는 특성을 보이며, 분해가스종류로

서는 작은 량의 탄화수소 가스, furan 성분과 함께 동일 온도에서 절연유의 산화에 의한 것보다 훨씬 많은 양으로 수분은 물론 CO와 CO_2가 생성된다. CO와 CO_2는 절연지의 흡습량, 절연유의 산소량, 온도와 함께 증가하며 CO는 상대적으로 더욱 크게 증가한다. 이와 같은 특성 때문에 일반적으로 셀루로즈지의 열화특성을 진단하는데 CO와 CO2가스를 사용하고 있다.

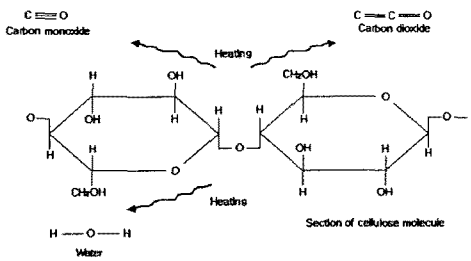


그림 2 셀룰로즈의 분해가스

2.3 기타 분해가스

가스는 녹, 철, 코팅이 안된 표면, 보호페인트를 포함한 화학적 반응에서 발생할 수 있다. 산소가 주위에 있으면 물과 함께 Steel의 반응으로 수소가 만들어진다. 수소는 또한 변압기 제작시 stainless steel내에 포함되고, 제작과정, 용접과정에서 생성되고 절연유속에서 서서히 방출된다. 유중가스분석에서 탄화수소 가스가 보이지 않을 때 수소가스가 있으면 이러한 문제를 지적할 수 있다.

3. 유중가스분석법

변압기의 어떤 한 부분에서 비정상적으로 높은 에너지 소비가 일어날 때 가스가 발생한다. 이것은 절연체의 화학적 열화에 의해서 나타나기 때문에 발생되는 가스의 종류는 저분자량 CH계분자의 결합 혹은 해리에너지에 따라서 결정된다. '2항'에서 언급하였듯이 유중가스종류는 대략 10가지 이내로 정해져 있으며, 이것은 변압기의 고장종류가 국부과열, 부분방전, 아크 등으로 거의 일정하여 따라서 발생되는 에너지손실의 범위도 거의 일정하기 때문인 것으로 생각된다.

유중가스의 양은 고장의 종류나 범위, 고장지속시간 등에 의해서 영향을 받기 때문에 초기에 수행된 유중가스분석법에서는 유중가스 절대량으로 열화상태를 판정하고 표 1과 같은 발생된 key가스의 특성을 이용하여 고장의 원인을 진단하였다. 유중가스량의 측정단위는 부피나 ppm을 사용하고 있기 때문에 동일한 에너지로 동일한 량의 가스가 발생되더라도 변압기용량이나 유량이 다를 때는 측정치는 달라지게 되고 그에 따라 진단결과도 차이가 나는 결점을 가지고 있다. 또한 key 가스법에 의한 진단은 그 판정기준이 정성적이기 때문에 많은 경험을 필요로하게 된다.

표 1 key가스법에 의한 고장분석

고장원인	가스구성
아크	H_2, C_2H_2 대 CH_4, C_2H_4 소
코로나	H_2 대, CH_4 중, C_2H_6, C_2H_4 소
절연유 과열	C_2H_4 대, CH_4 중, H_2 C_2H_6th
절연지과열	CO, CO_2 대

표 1에서도 알 수 있듯이 고장원인에 따라 각 가스량은 일정한 범위에서 존재함을 알 수 있다. 이러한 특성을 이용하여 고장원인에 따라 가스조성을 구성하고 그 비를 정량화하여 가스분석을 하는 기법이 개발되게 되었다. 이와 같은 가스조성비를 이용한 장점으로서는 변압기의 용량이나 부피에 무관하며, 정량화에 따른 판정이 쉽고, 프로그램화도 가능한 이점등이 있다. 표 2는 그 개발 예와 조성가스종류를 보여주고 있다.

표 2. 조성비를 이용한 가스분석방법

분 석 법	조성가스 종류	특 징
Donenbur	CH_2/H_2, C_2H_2/C_2H_4, C_2H_2/CH_4, C_2H_2/C_2H_2	가스량이 기준치 이상일 때 적용, 과열, 코로나, 아크의 3가지 고장원인을 진단
Rogers (IEEE C57-104-1)	C_2H_2/C_2H_4, CH_4/H_2, C_2H_4/C_2H_6	가스량 적용 한계치가 없음, 부분방전, 아크, 저온, 중온, 고온과열의 5가지 고장원인을 진단
IEC 6059 (1999)	C_2H_2/C_2H_4, CH_4/H_2, C_2H_4/C_2H_6	가스량 적용 한계치가 없음, 부분방전, 저에너지방전, 고에너지방전, 저온, 중온, 고온과열의 6가지 고장원인을 진단
Duval	CH4, C2H2, C2H4	가스량 적용 한계치가 없음,, 과열, 코로나, 아크의 3가지 고장원인을 진단

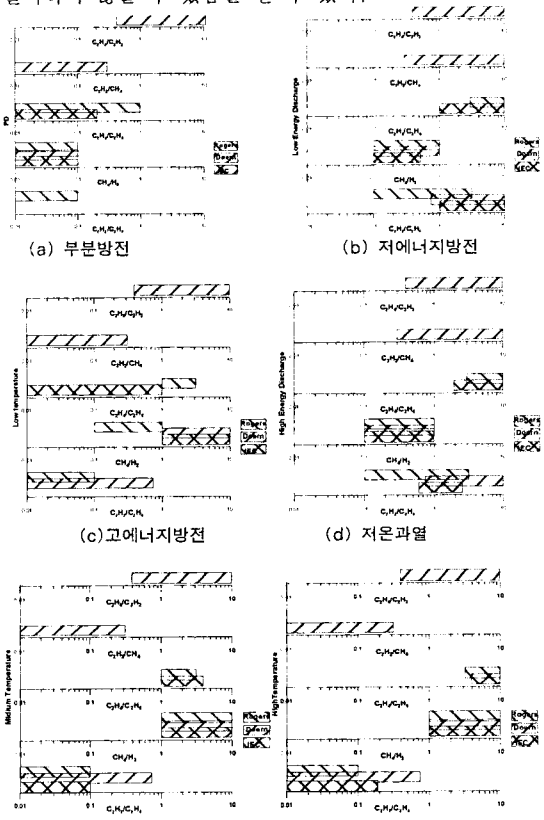
표 2의 가스분석법외에도 nomograph법 등 여러 가지 분석법이 있으나 대부분이 H2, C2H2, C2H4, C2H6, CH4의 5가지 가스를 조합하여 진단을 수행하고 있으며, 진단결과도 크게 부분방전(코로나), 아크방전, 과열의 3가지로 분류하고 있다. 또한 Donenburg법에서는 가스량이 어느 정도 이상일 때만 적용할 수 있도록 규정하고 있지만 나머지 3가지 방법에서는 이러한 기준을 적용하고 있지 않다. 일반적으로 변압기는 열분해가스가 아니더라도 공기나 봉입가스와의 접촉, 정상운전온도에서의 가스발생, 산화에 의한 가스발생 등으로 일정량의 가스가 발생하는 것으로 알려져 있다. 만약 고장이 발생할 경우 가스량은 이 정상치보다 커지게 된다. 따라서 가스조성비법을 사용하기 위해서는 고장의 징후를 알 수 잇는 각 가스량의 최소기준치와 같이 사용하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

4. 가스조성비에 의한 유중가스분석법의 비교

유가스조성비에 의한 유중가스분석법의 특성비교를 위하여 표 2의 Donenburg법, Rogers법, IEC법에 대한 각 고장원인별 조성비의 특성비교를 실시하였다. 각 방법마다 고장원인은 일치하고 있지 않지만 고장의 원인을 IEC에서 사용하고 있는 부분방전, 저에너지방전, 고에너지방전, 저온, 중온, 고온과열의 6가지로 분류하였다. 따라서 Donenburg법과 같이 고장원인이 부분방전, 아크, 과열로 분류되어 있을 경우 부분방전은 부분방전, 아크방전은 저에너지방전과 고에너지방전, 과열은 저온, 중온, 고온과열에 같은 기준으로 중복하여 적용하도록 하였다.

였그림 3은 각 진단법의 6가지 고장원인에 대한 조성비 구성특성을 보여주고 있다. 그림 3에서 Rogers법과 IEC법은 사용되는 가스조성이 일치하지만 Doeneburg법에서는 두가지 진단법에 대하여 C2H2/C2H4가 없는 반면 두 진단법에서는 없는 C2H6/C2H2와 C2H2/CH4가 있음을 알 수 있다. 그러므로 Rogers, IEC법과 Donenburg법에 의한 진단결과는 일치할 수

없음을 알 수 있다. 또한 Rogers법과 IEC법을 비교했을 때 각 고장원인에서 각 조성비가 비슷한 경향을 보이지만 완전히 일치하지는 않으며, 특히 저온과열의 경우 CH4/H2, C2H4/C2H6는 조성비가 일치하지 않고 있음을 알 수 있다. 따라서 이러한 특성으로 비추어 하나의 가스분석결과에 대하여 3가지 진단법의 진단결과는 일치하지 않을 수 있음을 알 수 있다.



(a) 부분방전 (b) 저에너지방전

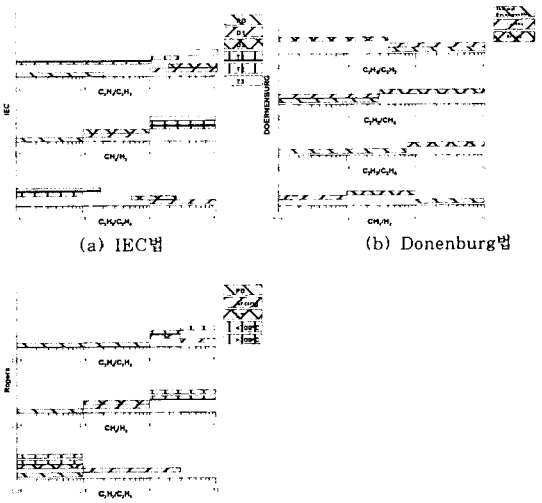
(c)고에너지방전 (d) 저온과열

(e) 중온과열 (f) 고온과열

그림 3. 고장원인에 따른 유중가스분석법의 비교

그림 3에서는 이상현상에 따른 3가지의 가스비를 이용한 유중가스분석기중의 비교를 보여주었다. 그림 4는 3가지 분석법의 고장원인에 따른 가스비분포를 보여주고 있다. 그림 4의 (a)는 IEC법을 보여주고 있으며, PD는 부분방전, D1은 저에너지방전, D2는 고에너지방전, T1은 저온과열, T2는 중온과열, T3는 고온과열을 뜻한다. 그림 (b)는 Donenburg법을 보여주고 있으며, 고장원인으로는 부분방전, 아크방전, 과열의 3종류로 되어있다. 그림(c)는 Rogers법으로서 5가지의 고장원인으로 나누어져 있다. 그림 4에서 알 수 있듯이 3가지의 가스조성비에서 각 조성비기준의 경계점을 기준으로 고장원인이 분류되어 있으며, 이는 가스조성비가 경계점 근처에 분포할 경우 고장원인을 잘 못 판정할 수 있다. 또한 그림 (a)의 IEC진단법중 C2H2/C2H4인 경우 가스조성비가 0.2-0.5사이에는 어떠한 고장원인도 정의되어 있지 않으므로 이 부분에서는 고장의 판별이 불가능함을 알 수 있다. 또한 고장원인은 판별이 가능하더라도 이상정도의 판정이 어려우므로 이상정도의 판정이 가능한 방법이 병행되어야 하고 셀룰로즈와 같은 고체절연물의 이상진단도 고려되어야 한다.

표 3은 실제 측정된 2가지의 유중가스예를 보여주고



(a) IEC법 (b) Donenburg법

(c) Rogers법

그림 4 고장원인에 따른 가스조성비의 분포

있다. 변압기 내부점검결과 예제1은 절연유의 변색이 관찰되었으며, 예제2는 느슨한 도체간접속에 의한 과열현상이 관찰되었다. 이 예에서 알 수 있듯이 예제 1과 같이 3가지의 가스비 진단법은 가스량에 따라서 진단결과가 일치할 수도 있지만 예제 2와 같이 해당되는 진단결과가 없는 경우도 있다.

표 3 가스비법에 의한 유중가스분석 예

구분	H2	CH4	C2H2	C2H6	C2H4	진단결과
예제 1	22	127	2	89	429	IEC:고온과열 Rogers:700℃이상 Donenburg:과열
예제 2	1700	43	0	6	2	세 진단법 모두 해당되는 것이 없음

5. 결 론

가스조성비에 의한 유중가스분석법중 현재 많이 사용되고 있는 Donenburg법, Rogers법, IEC법, Duval법의 특성에 대하여 살펴보았다. 사용되는 가스종류는 5가지로서 H2, CH4, C2H2, C2H4, C2H6이고 고장원인은 크게 부분방전과 아크방전, 과열로 분류되어 있다. 조성비에 의한 방법은 변압기의 용량이나 부피에 무관하며, 정량화에 따른 판정이 쉽고, 프로그램화도 가능한 이점 등이 있으나 각 방법마다 고장원인이 다르게 판정할 우려가 있고 또한 이상정도의 판정이 어려우므로 이상정도의 판정이 가능한 방법이 병행되어야 하고 고체절연물의 이상진단도 고려되어야 한다.

[참 고 문 헌]

[1] E. Dornenburg et al., "Monitoring oil cooled transformers by gas analysis", Brown-Boveri Rev. 61, p.238-247, May 1974

[2] ANSI/IEEE C57.104-1978, "Guide for the detection and determination of generated gases in oil-immersed transformer and their relation to the serviceability of the equipment"

[3] IEC Publication 60599, Interpretation of the Analysis of Gases in Transformers and Other Oil_Filled Electrical Equipment in service, First Edition, 1999

[4] Paul J. Griffin, "Criteria for the interpretation of data for dissolved gases in oil from transformer", Electrical Insulating Oil, STP 998, ASTM, pp. 89-106, 1988