

유중가스분석법을 이용한 대용량 변압기 고장진단 사례 고찰

박진엽, 박인규, 진수환
한국수력원자력(주) 원자력발전기술원

A study on failure diagnosis examples of Large oil filled transformer using dissolved gas analysis

Jin Yeub Park, In Kyoo Park, Soo Hwan Chin
Korea Hydro & Nuclear Power Company, Nuclear Engineering Technology Institute[NETEC]

Abstract - 발전소에 설치된 대용량 변압기의 고장사례에 절연유 온도에 따른 가스발생 형태, 가연성가스 성분비를 이용한 Rogers Ratio 법, 발생가스별 고장형태 및 원인분석 방법을 적용하여 고장원인을 진단하고 실제 확인된 고장원인을 고찰하였다. 사례 1은 저압측 탭권선이 과열로 손상된 사례로 온도에 따른 가스발생 형태 및 발생 가스별 고장 형태를 이용한 진단결과는 300℃ 이상에서 과열이 된 것으로 진단되어 거의 일치하나 Rogers Ratio 법을 적용하면 150℃ 정도에서 저온과열된 것으로 진단되어 약간의 차이를 보였다. 사례 2는 변압기 철심의 Burr 발생, 철심간 단락으로 인한 과열 및 아크가 발생된 고장으로 가스발생 패턴이 절연유 온도에 따른 가스발생 형태 및 사례 1과는 차이가 있고 특히, 내부 아크에 의해 발생하는 아세틸렌(C₂H₂)은 계속 증가하는 반면 "Hot Metal Gas" 중의 하나인 에탄(C₂H₆)은 미량으로 특이한 가스발생 형태를 보였다. Rogers Ratio 법과 발생가스별 고장 형태 및 원인분석법에 의한 진단결과는 일치하였다.

1. 서 론

유입식 변압기의 절연물로 사용되는 절연유, 절연지, 프레스 보드, 절연테이프 등은 변압기 과부하 또는 고장으로 발생되는 열 또는 아크에 의해 분해되면서 H₂, CO, CO₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂ 등 각종 가스를 발생하게 되는데 이를 유중가스라고 하고, 유중가스 발생농도 및 패턴을 이용한 각종 변압기 고장 및 상태 진단방법이 널리 사용되고 있다. 또한 최근에는 유중가스를 On-Line 상태에서 분석하여 진단하는 여러 가지 방법들이 개발되어 Off-Line 분석방법과 함께 각광을 받고 있다.

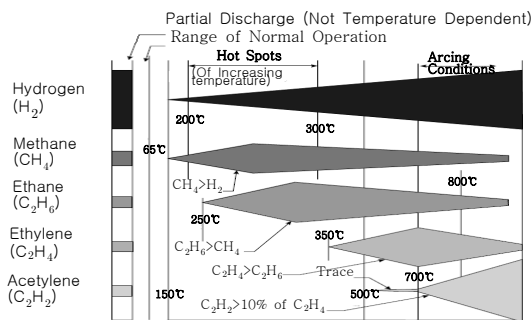
본 논문에서는 대용량변압기의 유중가스 농도가 급격하게 증가하여 예비품 변압기로 교체한 사례에 유중가스분석 방법 중 절연유 온도에 따른 가스발생 형태, 가연성가스의 성분비를 이용한 Rogers Ratio 방법, 발생가스별 고장 형태 및 원인분석 방법을 적용하여 변압기 고장원인을 진단하고, 진단결과와 실제 고장원인의 차이점을 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 변압기내 가스 발생

유입식 변압기내에서 과열이나 아크, 코로나, 부분방전 등이 발생하면 변압기내 절연유 및 절연물이 열화 또는 열분해 되어 가스가 발생하게 된다. 보통 변압기 절연유는 150℃ 이상에서 열분해 되기 시작하여 온도가 증가함에 따라 수소(H₂), 메탄(CH₄), 에탄(C₂H₆), 에틸렌(C₂H₄), 아세틸렌(C₂H₂)을 발생하게 되고, 절연유가 함유된 절연지 등 고체 절연물은 100℃ 정도에서 분해되어 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂), 수소(H₂), 메탄(CH₄) 가스를 발생하게 되므로 이를 이용하여 변압기 고장 및 상태를 진단할 수가 있다.[2]

<그림 1>은 변압기 절연유 온도에 따른 가스발생 형태이다.



<그림 1> 절연유 온도에 따른 가스발생 형태

2.2 가연성가스의 성분비에 의한 변압기 고장진단

절연물의 열적 열화이론에 근거한 방법으로 변압기 유중가스 중 가연성가스의 성분비를 R1(Ratio1)=CH₄/H₂, R2=C₂H₂/C₂H₄, R3=C₂H₂/CH₄, R4=C₂H₆/C₂H₂, R5=C₂H₄/C₂H₆의 5가지로 나눌 수가 있으며, 성분비를 이용하는 방법은 두 가지가 있는데 이중 Doernenburg Ratio 법은 R1, R2, R3, R4를 이용하고, Rogers Ratio 법은 R1, R2, R5를 이용하여 판정한다.[1] <표 1>은 Rogers Ratio 법에 의한 가스성분비에 따른 고장원인이다.

<표 1> Rogers Ratio 법에 의한 가스 성분비에 따른 고장원인

Case	R1	R2	R5	고장원인
0	>0.1 <1.0	<0.1	<1.0	정상
1	<0.1	<0.1	<1.0	저 에너지 아킹(부분방전)
2	0.1- 1.0	0.1- 3.0	>3.0	고 에너지 아킹(방전)
3	>0.1 <1.0	<0.1	1.0- 3.0	저온 과열
4	>1.0	<0.1	1.0- 3.0	고온과열(<700℃)
5	>1.0	<0.1	>3.0	고온과열(>700℃)

2.3 발생가스별 고장형태 및 원인

발생되는 유중가스의 종류에 따라 고장 원인을 진단할 수가 있는데 IEC 60599에 따른 발생가스별 고장 형태 및 고장원인은 <표 2>와 같다.[1][2]

<표 2> 발생가스별 고장 형태 및 원인

발생가스	고장 형태 및 원인
H ₂ ,미량의 CH ₄ 와 C ₂ H ₆ ,약간의CO	전기적인 스트레스 및 열화로 인해 절연이 약해진 부위에서 부분방전(코로나) 발생
H ₂ ,CH ₄ (중이 절연물이 있는 곳이면 약간의 CO),미량의 C ₂ H ₆	절연불량, 금속물의 집적불량으로 인한 저에너지 방전(Sparking)으로 발생, 절연유 내에 탄소가루 존재할 수 있음
H ₂ ,CH ₄ ,C ₂ H ₆ ,C ₂ H ₄ 와 아킹시 발생하는 C ₂ H ₂ , 절연지가 과열되면 CO도 발생	탭 절환기, 탭권선 부위의 접촉불량으로 인한 용융, 열화 및 전기적 스트레스로 인해 절연이 약해진 부위의 고에너지 방전(아킹)에 의한 절연유의 탄화, 절연물의 과열에 의해 발생
H ₂ ,CO	절연지로 절연된 부위에서 과부하 또는 냉각문제, 탭절환기, 탭권선의 접촉 불량, 누설전류, 누설자속으로 인한 300℃ 이하의 과열에 의해 발생하는 것으로 절연지가 변색됨
H ₂ ,CO,CH ₄ ,C ₂ H ₆ ,C ₂ H ₄	300~700℃의 과열로 인하여 발생하는 것으로 절연지의 파괴, 절연유가 심하게 탄화됨
H ₂ ,CO,CH ₄ ,C ₂ H ₆ ,C ₂ H ₄ 와 다량의 C ₂ H ₂	700℃ 이상 고에너지의 전기적 아크에 의한 발생으로 금속의 변색, 절연지의 파괴, 절연유 탄화

2.4 변압기 고장사례 1

본 변압기는 1차측 20.9kV, 2차측 345kV인 발전소 주변압기로 용량은 335.3/395.7MVA, 단상, 외철형이고, 냉각방식은 송유풍냉식이다. 동 변압기는 '94년 상업운전이후 12년 동안 정상운전 중 이었으나, '06년 5월

이후 수소(H₂), 에틸렌(C₂H₄), 에탄(C₂H₆)가스 등이 급격하게 증가하였으며, 5개월 동안의 유증가스농도 및 발생주기는 <표 3>과 같다. 가스발생 형태는 수소가스 주도형으로 부가적으로 과열에 의해 발생하는 메탄(CH₄), 에탄(C₂H₆), 에틸렌(C₂H₄) 등의 가스가 발생되었으며, '06년 6월 이후 총 가연성가스 발생량이 요주의 기준값 이상으로 증가하였다.

<표 3> 변압기 유증가스 분석결과(사례 1)

가스종류	요주의 값 (ppm)	분석결과(ppm)						
		3.17	5.03	6.09	7.03	7.10	7.13	7.17
수소(H ₂)	400~800	26	185	556	598	783	885	812
일산화탄소(CO)	350~600	40	82	132	103	157	161	143
메탄(CH ₄)	250~750	17	71	162	175	317	328	317
에틸렌(C ₂ H ₄)	300~750	27	109	204	212	379	385	365
에탄(C ₂ H ₆)	250~750	13	59	146	174	325	336	323
아세틸렌(C ₂ H ₂)	20~60	0	0	0	0	0	0	0
프로판(C ₃ H ₈)	250~750	13	66	142	185	313	339	320
총가연성가스(TCG)	1000~2500	136	572	1342	1447	2229	2434	2280

2.4.1 변압기 고장진단

사례 1의 경우 처음부터 수소가스 주도의 패턴으로 진행되었으며, 절연유의 열분해시 발생하는 탄화수소계열(CnHm)의 가스 발생량이 증가하고, 에틸렌(C₂H₄)이 에탄(C₂H₆)의 발생량을 초과하고 있으므로 <그림 1>의 온도에 따른 가스발생 형태를 볼 때 350℃이상의 온도에서 열분해가 일어나고 있으며, 일산화탄소(CO)의 농도가 초기에 증가를 하다 거의 일정하게 유지되는 것으로 볼 때 절연물이 거의 없는 부위에서 과열이 일어나고 있고, 아세틸렌(C₂H₂) 가스의 발생이 없으므로 내부에서 방전이나 아크는 없는 것으로 예상되었다.

초기분석 유증가스 값보다 약 10배 이상 증가한 7월 3일 값을 기준으로 Rogers Ratio법을 적용하면 R1=0.29(175/598), R2=0(0/212), R5=1.21(212/174)로 <표 1>의 Case 3에 해당되어 절연물이 저온(150℃ 정도)과열이 되고 있는 것으로 진단되었으나 <표 2>의 발생가스별 고장 형태 및 원인을 적용하면 300℃와 700℃ 사이에서 과열이 되고 있는 것으로 분석되어 Rogers Ratio법의 분석결과와 약간 차이가 있다.

2.4.2 변압기 내부점검

유증가스 발생원인 점검을 위해 변압기를 계통에서 분리한 후 내부점검을 실시한 결과 <그림 2>와 같이 저압측 탭권선 인출부의 절연지가 과열로 인해 심하게 탄화되었으며, 내부 소선도 일부 용단된 것을 확인하였다.



<그림 2> 저압 탭권선 과열 및 손상

2.5 변압기 고장사례 2

본 변압기도 고장사례 1과 동일용량의 변압기로 저압측 탭권선의 용량부족으로 인한 과열문제로 제작사로 반출되어 수리가 되었으며, 주요 수리내용은 저압측 탭권선이 인출되는 권선을 분해한 후 기존 탭권선을 제거하고 보강된 탭권선을 설치하였다.

2.5.1 변압기의 유증가스 변화

설치 후 초기 분석 시는 이상이 없었으나 3월23일에 분석한 결과, 변압기 내부의 아크발생시 주로 발생하는 아세틸렌을 비롯하여 탄화수소계열의 가스농도가 급격하게 증가되었으며 정지 시까지 유증가스농도 및 변화주기는 <표 4>와 같다. 유증가스농도가 계속 증가하여 요주의 값에 도달되어 발전소 안전운전을 위해 변압기 부하를 3월 24일에 80%로 감소시킨 후 확인 결과 유증가스 증가추세가 멈추었다.

2.5.2 변압기 고장진단

사례 2의 경우 사례 1과는 달리 수소(H₂)가스 및 일산화탄소(CO)의 농도가 높지 않았고, 일반적으로 변압기 내부의 통전부 접촉 불량으로 인한 과열시 발생되어 'Hot Metal Gas'로 불리는 에탄(C₂H₆)의 농도는 높은데 반해 에틸렌(C₂H₄)의 농도는 매우 낮았으며, 또한 500℃~700℃ 이상에서 발생하는 아세틸렌(C₂H₂)은 높은 편이지만 에탄(C₂H₆)의 농도가 오히려 메탄(CH₄)의 농도보다 너무 낮아 <그림 1>의 가스발생 형태와는 다른 양상을 보였다.

<표 4> 변압기 유증가스 분석결과(사례 2)

가스종류	요주의 값 (ppm)	분석결과 (ppm)						
		3.06		3.23		3.24		3.25
		0.00	10:00	22:00	5:00	16:00	2:00	18:00
수소(H ₂)	400~800	0	97	202	204	192	199	171
일산화탄소(CO)	350~600	49	125	128	127	127	130	119
메탄(CH ₄)	250~750	0	100	236	255	254	264	191
에틸렌(C ₂ H ₄)	300~750	0	146	366	371	361	353	296
에탄(C ₂ H ₆)	250~750	5	6	21	21	21	21	20
아세틸렌(C ₂ H ₂)	20~60	0	11	32	32	29	27	22
프로판(C ₃ H ₈)	250~750	0	0	0	0	0	0	0
총가연성가스(TCG)	1000~2500	54	485	985	1010	984	994	819

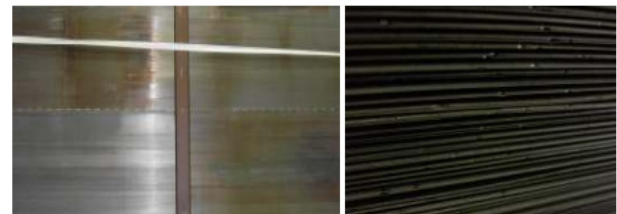
총가연성가스(TCG)의 농도가 높았던 3월24일 05:00의 가스농도를 기준으로 Rogers Ratio를 구하면 R1=1.25(255/204), R2=0.086(23/371), R5=17.6(371/21)으로 <표 1>의 Case 5에 해당되어 700℃이상의 고온과열로 진단되고, <표 2>의 발생가스별 고장 형태 및 원인을 적용하면 수소(H₂), 일산화탄소(CO), 에탄(C₂H₆), 메탄(CH₄), 에틸렌(C₂H₄)이 주성분이고 아세틸렌(C₂H₂)의 농도가 높으므로 권선내부 또는 철심 내 700℃이상의 고온과열 또는 아크가 원인일 것으로 예상되므로 Rogers Ratio 결과와 일치한다.

2.5.3 변압기 내부점검

<표 4>에서 변압기 부하를 80%로 줄인 후 전체적으로 유증가스농도가 감소하였으므로 전류의 변화에 따라 영향을 받는 곳, 즉 권선의 연결 또는 접촉부에 이상이 있고, 일산화탄소의 증가량이 미미한 것으로 보아 절연물질이 별로 없는 부위가 이상이 있을 것으로 예상하고 절연유 배유 후 변압기 내부점검을 하였으나, 권선의 연결 또는 접촉부에는 이상이 없었으며, 약간의 금속성분의 탄화된 이물질 외에는 고장 원인을 발견하지 못하였다.

2.5.4 정밀원인 점검

문제가 된 변압기를 제작사 공장에서 권선까지 해체하여 정밀점검을 한 결과 주회로에 해당하는 권선 및 접촉부에는 이상이 없었으며, 철심 단부에 Burr 및 철심 간 단락, 철심과열 및 아크에 의한 것으로 추정되는 손상 흔적 등이 발견되었다. <그림 3>은 철심의 과열부위 및 아크에 의해 손상된 부위이다.



<그림 3> 철심면 과열 및 아크손상

따라서 철심의 아크에 의해 아세틸렌(C₂H₂)가스가 다량 발생되었고, 철심이 손상되면서 탄화 이물질이 생성된 것으로 확인되었다.

3. 결 론

전력용 변압기의 유증가스를 이용한 변압기 진단 방법은 1960년대부터 사용되어 왔고 여러 가지 방법들이 개발되어 있지만 변압기의 가스발생형태가 다양하고 복잡하기 때문에 어느 한 가지 방법을 적용하여 평가하기는 곤란하다. 사례 1, 2에서 보듯이 모두 변압기 내부 과열에 의해 발생하는 가스종류는 유사하지만 가스발생량에 많은 차이를 보임을 알 수 있고, 특히 사례 2의 철심과열 및 아크에 의한 가스발생 형태는 일반적인 과열에 의한 가스패턴과 달리 특이한 형태의 패턴을 가짐을 알 수 있다. 두 가지 사례 모두 앞으로의 유증가스를 이용한 변압기 고장진단에 많은 도움이 될 것으로 예상된다.

[참 고 문 헌]

[1] IEEE Std C57.104 " IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, p14-18, 1991.
 [2] UNITED STATES DEPT. of The Interior Bureau of Reclamation DENVER, COLORADO "Transformer Maintenance", p37-50, 2000.
 [3] IEC 60599. Edition2.1 "Mineral Oil-impregnated electrical equipment in service-Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis, p8-13, 2007.