

변압기 유중 가스 진단 오차 원인에 대한 연구

조성민, 이양진, 김용성, 김재철, 권동진*
 숭실대학교, 전력연구원*

A study on Cause of Errors of Dissolved Gases Analysis in Transformer

Sung-Min Cho, Yang-Jin Lee, Young-Sung Kim, Jae-Chul Kim, *Dong-Jin Kweon
 Soongsil Univ, *KEPRI

Abstract - Dissolved gas analysis (DGA) is widely used to detect incipient faults in oil-filled electrical equipment. KEPCO make a rule of DGA in 1985. They have been diagnosing power transformer using their DGA criteria.

In this paper, we analyze the result of DGA data about transformer in the substation. We try to find out what is cause of an error in DGA diagnosis considering accuracy in extracting gases from mineral oil in transformer.

The carbon-monoxide was primary reason of warning in DGA data. We specially consider that aging is a cause of generating of carbon-monoxide in power transformer.

1. 서 론

전력용 변압기는 전력계통에서 중요한 역할을 하는 장비로 그 신뢰성과 건전성이 중요시 되고 있어 변압기의 상태를 진단하는 많은 기술들이 연구되고 있다.

유입 변압기는 부분방전, 아크 발생 및 국부적인 과열 등의 고장이 발생하면 그 고장 에너지에 따라 수소(H₂), 아세틸렌(C₂H₂), 메탄(CH₄), 에탄(C₂H₆), 에틸렌(C₂H₄), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂) 등과 같은 가스가 발생하게 되고 이 가스들은 절연유에 용해되어 절연유의 순환에 의해 변압기 절연유 전체에 걸쳐 일정한 농도를 유지하게 된다. 이때 절연유를 채취하여 용해되어 있는 가스의 성분을 조사하면 변압기의 고장 유무를 진단할 수 있다. 이러한 진단 방법을 DGA(Dissolved Gases Analysis)라 한다.

유중 가스 진단은 1960년부터 연구되어 현재 전 세계적으로 사용되고 있는 진단 기술이다. 이에 따라 한국전력공사도 1982년 전력연구원에 가스분석실을 설치하고, 154kV급 이상의 변전용 및 발전용 변압기를 대상으로 절연유 가스분석 업무를 처음으로 실시하였고 분석대상의 증가로 인해 중부 이북지역은 남서울전력관리처에서, 중부이남지역은 대전전력관리처에서 발전용 변압기에 대한 가스분석 업무를 담당하고, 전력연구원에서는 발전용 변압기에 대한 가스분석 업무를 담당하고 있다.

유중 가스 진단의 판단 기준으로 IEEE의 기준과 IEC60599등 많은 판단 기준이 발표 되었으나 각 나라의 실정에 맞게 전력사를 마다 자체적인 기준을 적용하고 있고 한편도 1985년에 최초 제정하여 몇 번의 개정을 거쳐 현재의 기준으로 되었다.

2. 본 론

2.1 유중 가스 분석 데이터 분석

한전의 유지보수 시스템의 자료를 통하여 유중 가스 분석 데이터를 분석 해 보았다. 분석한 자료의 관리처별 154kV급 변전소 수와 154kV급 변압기 수량은 아래의 [표-1]과 같고 발전소 및 변환소를 제외한 순수한 변전소의 변압기의 자료만을 고려하였다.

[표-1] 유중가스 조사 대상

중부	서울	남서울	수원	인천	제천	제주	합계
변전소	62	56	41	29	43	7	238
변압기	468	466	338	243	334	54	1,903
남부	부산	대전	광주	대구	창원	전주	합계
변전소	49	49	45	66	39	22	270
변압기	340	356	277	265	291	164	1,693

위 [표-1]과 같은 변전소와 변압기를 대상으로 [표-2]와 같은 한전의 유중 가스 진단 기준을 적용하여 하여 요주의 이상의 결과를 얻은 횟수를 아래 [표-3]에 정리하였다.

[표-2]한전의 유중가스 진단 기준(200kV이하)

	요주의	이상	위험
H ₂	400-800	801-1,200	-
CO	400-700	701-1,000	-
C ₂ H ₂	25-80	81-150	150 이상
CH ₄	250-750	751-1,000	-
C ₂ H ₄	300-750	751-1,000	-
C ₂ H ₆	250-750	751-1,000	-
C ₃ H ₈	250-750	751-1,000	-
TCG	1,000-2,500	2,500-4,000	4,000 초과
TCG 증가량	정상상태에서 200/월 이상	요주의 상태에서 200/월 이상	이상상태에서 300/월 이상
조치사항	추적조사 실시 (3개월/1회)	추적조사 실시 (1개월/1회)	운전정지후 내부점검 실시
신 설 변압기	운전중인 변압기 기준치의 50%, 1개월 주기로 추적조사		

분석 대상이 154kV 변압기이기 때문에 [표-2]와 같은 200kV이하의 기준을 적용하였다.

[표-3] 요주의 이상의 가스별 분포

구분	요주의	이상	위험	합계	%
H ₂	40	10	37	87	2.7
C ₂ H ₂	135	13	11	159	4.9
C ₂ H ₄	171	31	42	244	7.5
C ₂ H ₆	649	11	11	671	20.6
CH ₄	117	20	18	155	4.7
C ₃ H ₈	138	6	2	146	4.5
CO	1630	147	18	1,795	55.1
합계	2,880	238	139	3,257	100
%	88.4	7.3	4.3	100	

[표-3]의 가스 분석 결과를 보면 일산화탄소(CO)가 절반을 차지 할 정도로 가장 많이 요주의 이상의 결과가 나왔고 그다음 에탄(C₂H₆)이 20%를 차지하였다. 그 외의 가스들은 10%이내의 분포를 나타 내었다. 참고적으로 [표-3]의 결과 값들은 두 종류 이상의 가스가 동시에 요주의 이상의 결과를 나타낸 경우를 고려하지 않고 나타 낸 것이다.

여기서, 가장 빈도가 높게 나타난 에탄(C₂H₆)과 일산화탄소(CO)에 대해 좀 더 자세히 분석하여 보면, 에탄(C₂H₆)의 발생은 절연유 및 고체 절연물의 지온 과열이 추정되는 결과로 이상과 위험의 단계에서는 대부분 프로판(C₃H₈)가스와 함께 발생하였고 요주의 단계에서는 649건 중 479건이 에탄(C₂H₆)가스만이 요주의 단계의 농도를 보였지만 대부분 프로판(C₃H₈)가스가 50~250PPM의 값을 갖고 있었고 일산화탄소(CO)가 100~300PPM, 메탄(CH₄)이 50~350PPM의 농도를 보였다.

에탄(C₂H₆)의 요주의 레벨의 다른 가스와의 구성을 [표-4]에 정리하였다.

[표-4] C₂H₆ 요주의시 가스 성분 구성

경고 가스 (요주의 이상)	횟수	내 용
C ₂ H ₆	479	C ₃ H ₈ , C ₂ H ₄ , CH ₄ 가 요주의 기준치에 근접하게 존재함
C ₂ H ₆ , C ₃ H ₈	76	절연유의 저온과열로 예상
C ₂ H ₆ , CO	27	고체 절연물의 저온과열로 예상
C ₂ H ₆ , C ₂ H ₄	5	절연유의 고온 과열로 예상
C ₂ H ₆ , C ₂ H ₄ , CH ₄	37	절연유의 고온 과열로 예상
총 계	587	

위의 결과로 과열이 예상되는 경우 과열에 의해 발생하는 다른 가스들(에틸렌(C₂H₄), 에탄(C₂H₆), 일산화탄소(CO))이 이론적 예상에 부합하게 같이 발생하였다.

다음으로 가장 높은 빈도의 경고로 요주의 이상의 원인이 되었던 일산화탄소에 대해 자세히 분석하여 보면, 일산화탄소는 요주의 레벨의 경고는 1630회로 높은 빈도를 나타내나 이상은 147회로 요주의에 비해 상당히 줄어들고 위험은 18회로 다른 가스들의 위험 레벨의 경고 발생 빈도와 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다.

일산화탄소(CO)는 이산화탄소와 더불어 고체절연물인 유침지 등에서 경년열화와 과열에 의해 발생하는 가스로서 이미 알려져 있다.

그림. 1은 경년열화에 의한 일산화탄소(CO)와 이산화탄소(CO₂)의 증가를 보여주는 예로 중부 발전의 주변압기의 가스 분석 자료이다.

그림 1. 발전소 M.Tr의 경년열화에 따른 CO증가곡선

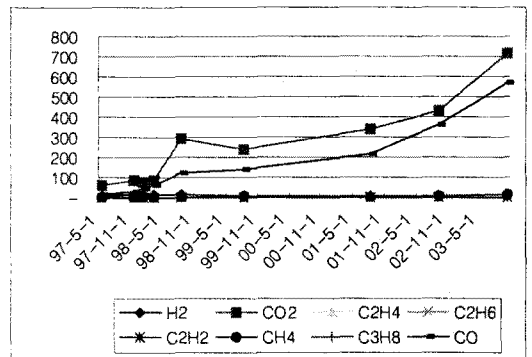


그림 1.은 경년열화에 따른 일산화탄소(CO)와 이산화탄소(CO₂)의 증가곡선으로 나머지 가스들은 10PPM이하의 낮은 농도를 나타낸다.

앞선 전력연구원의 연구에서 남부 지방의 변전소를 대상으로 대전전력관리처에서 유증 가스 분석을 실시한 결과 일산화탄소(CO)의 요주의 이상의 경고를 받은 변압기를 추적하여 정밀 검사를 실시하였다.

정밀 점검을 실시한 결과 [표-5]와 같은 결과가 얻어졌다. 그 결과 일산화탄소에 의해 정밀 검사를 25건을 실시하여 원인 불명이 20건이었고 원인을 찾은 경우는 5건으로 그 정확성이 매우 저조 했으며 고체절연물 과열로 판정된 3건의 유증가스 분석 결과를 그림 2에 도식하였다.

[표-5] 내부점검에 의한 고장원인

구분	H ₂	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CH ₄	C ₃ H ₈	CO	계
고정볼트 플립			3	4				7
고체절연물 과열			2				3	5
절연유증 아크 방전		1					2	3
절연유증 부분 방전	3							3
원인불명		2		3			20	25
계	3	3	5	7	0	0	25	43

그림 2. 고체절연물 과열 판정 가스 분석 결과

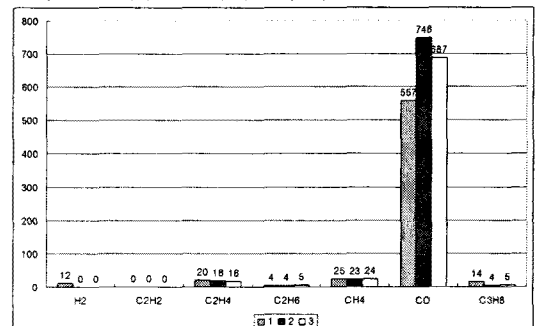


그림 2에서 보는 것과 같이 정밀 검사를 하여 고체 절연물 과열로 확인된 변압기의 유증 가스 분석의 결과에

서는 일산화탄소(CO)외에 메탄(CH₄)과 에틸렌(C₂H₄)이 많은 양은 아니지만 각각 20ppm과 25ppm 정도가 나타났다.

[표-5]의 결과를 보면 일산화탄소(CO)에 의한 요주의 이상의 판정을 받은 변압기를 대상으로 정밀 검사를 하여 고장원인을 찾기 못한 것은 일산화탄소(CO)가 고체 절연물의 과열에도 발생하지만 앞의 그림.1에서 보여 지는 것과 같이 경년 열화에 의해서도 발생하기 때문으로 예상 된다. 실제 한전의 유지 보수 시스템의 유증가스 분석의 결과인 [표-3]의 내용 중 일산화탄소(CO)가 요주의 레벨을 받은 경우인 1630건의 유증 가스 진단 결과를 가스별 농도로 조사한 결과 [표-6]와 같이 변압기 내부의 고온 과열이 발생 시에 나타나는 주요 가스인 에틸렌(C₂H₄)과 저온 과열 시에 나타나는 에탄(C₂H₆)의 농도가 10ppm이하인 경우가 각각 1060건과 1255건으로 매우 높은 비중을 차지하고 있고 메탄(CH₄)역시 967건으로 매우 높은 비중으로 나타나 있어 일산화탄소(CO)의 요주의 경도가 고체절연물의 과열에 의한 결과이기 보다는 경년 열화에 의한 경우가 많은 것으로 예측되어 진다.

[표-6] CO요주의시 에틸렌과 에탄의 가스 농도

	에틸렌 (C ₂ H ₄)	에탄 (C ₂ H ₆)	메탄 (CH ₄)
10ppm	1060	1255	967
미만	(65%)	(77%)	(59%)
100ppm	1605	1531	1578
미만	(98%)	(93%)	(97%)

일산화탄소(CO)의 경년 열화에 의한 발생은 운전 기간을 고려하여 판단 할 수도 있지만 정밀검사 및 진공여과를 시행 시기도 고려해야 하고 개방형 변압기는 환경적인 요소에 더욱 영향을 받기 때문에 쉽게 고려하기 힘들다.

2.2 여러 유증 가스 진단 기준의 CO 반영

변압기의 유증 가스 진단은 세계적으로 널리 사용되고 있으며 여러 기준이 제시 되어 왔고 IEEE와 IEC 등에서도 기준을 제시 하고 있다. 이러한 여러 기준에서는 일산화탄소(CO)를 어떻게 고려하고 있는지 [표-7]에 나타내었다.

[표-7] 여러 가스진단기준에서 CO반영 여부

	고려 여부	내용
IEEE*	○	CONDITION1 : 350이하 CONDITION2 : 351-570 CONDITION3 : 571-1400 CONDITION4 : 1400이상
IEC60599	○	CO ₂ /CO<3 이면 고장예상 Furanic Compound분석
DORNENBURG	×	
ROGERS	×	
일본전기협동연구회	○	요주의 I 기준 300ppm이상

*IEEE의 기준의 단위는 ppm

IEEE의 기준은 한전의 기준과 유사한 형태를 띠고 있고 일본의 기준에서 “요주의 I”이란 유증가스 분석 결과로부터, 이상하다고는 단정할 수 없지만, 정상 상태에서부터 이탈해 무엇인가 내부 변화가 있다고 판정되는 경우이다. “요주의 I” 기준 이외에 “요주의 II”와 “이상”

레벨이 있으며 이 기준은 아크 주요 발생 하는 가스인 아세틸렌(C₂H₂)과 고온 과열 발생시 발생하는 주요 가스인 에틸렌(C₂H₄), 그리고 총 가연성 양과 증가량으로 판정 한다.

2.3 유증 가스 분석의 정확성

한전의 유증가스 분석은 서론에서 언급한 것과 같이 변전소용 변압기는 남서울 전력관리처와 대전전력관리처에서 실시하고 발전용 변압기는 전력연구원에서 분석을 실시한다. 이 전력연구원과 전력관리처는 변압기 절연유에서 가스를 추출 하는 기법도 다르며 수행하는 인력의 업무 수행 능력에서도 차이를 보인다. 그렇기 때문에 기대할 수 있는 유증가스분석의 수치적 정확성이 필요하다.

국외의 사례로 CIGRE Task Force TF 15-01-07 를 보면 15개국의 25개의 연구실에서 정확성에 대한 실험을 하였다. 이미 가스의 농도를 알고 있는 표준 시료를 이용하여 각 연구실의 표준시료에 대한 DGA분석의 정확성을 측정 한 결과 [표-8]과 같은 결과를 얻었다.

[표-8]표준 시료를 이용한 round-robin test의 정확성

	중간 농도 (100ppm 이상)	낮은 농도 (100ppm 이하)
Best lab	±3%	±22%
Average	±15%	±30%
Worst lab	±65%	±64%

3. 결 론

본 연구의 결과로 다음과 같은 결론을 도출 하였다. 한전의 유증 가스 분석 결과 CO에 의한 요주의 이상의 판정 사례가 많아 고체 절연물의 과열을 예상하였으나 이는 정밀 검사 시 원인을 찾기 못한 경우가 많았다. 반면 CO에 이어 많이 경고를 발생하는 에탄은 저온과열을 예상하게 하는 가스이며 또한 과열 시에 발생하는 에틸렌과 메탄을 동반하는 경우가 많아 높은 적중률이 예상 되었다. 하지만 CO는 그 특성상 고체절연물의 과열 외에도 경년 열화에 의해 발생하는 경우도 있고 실제 CO요주의시 고체절연물 과열에 의해 생성 될 수 있는 에틸렌과 에탄, 메탄의 농도가 10ppm도 되지 않는 경우가 매우 많았다. 반면 정밀 검사 시 고체절연물 과열로 확인된 변압기에서는 에틸렌과 메탄이 약 25ppm의 농도를 보인 것과 비교하여 CO의 요주의 이상의 평가는 고체절연물에 의한 것 보다는 경년 열화에 의한 경우가 많은 것으로 사료된다. 또한 한전의 DGA의 수치적 정확성은 알 수 없지만 외국의 평균적인 정확도에서도 CO의 요주의 이상의 판정의 원인이 과열에 의한 것인지 경년 열화에 의한 것인지를 판정하는 것은 쉬운 것이 아니다. 이는 정밀점검과 절연유의 여과 계획 수립 시 일본처럼 CO반으로는 진단 오차율이 큰 것을 반영 하여야 한다.

[감사의 글]

본 연구는 전력연구원의 학술용역으로 인행 되었고 지원에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 권동진의 4명, “변압기 절연유 가스분석과 고장원인 검토”, 대한전기학회 논문집, 전기물성-용융부문C, 1229-246X, 제54권8호, pp.343-349, 2005
- [2] “주변압기 운영기준,” 한국전력공사 송변전처, pp.1-43, 2002
- [3] “유압 변압기의 보수관리,” 日本電氣協同研究會, 54卷, 5号, pp.1-474, 1999
- [4] M. Duval, “Improving the Reliability of Transformer Gas-in-Oil Diagnosis”, IEEE Electrical Insulation Magazine