

유중가스분석을 통한 변압기 내부결함 분석

Internal Defect Analysis of Transformers using DGA

김 성 환*, 박 태 식*

Seong-Hwan Kim*, Tae-Sik Park*

Abstract

DGA(Dissolved Gas Analysis) is regularly performed to detect internal defects of power transformers and prevent failures. The overheating or discharging in the transformer can be confirmed by DGA but the defective parts should be identified by internal inspection. However, winding or iron core defects cannot be checked by internal inspection, so it is impossible to establish actions by DGA alone. In this paper, the internal defect mode is analyzed and presented based on the transformer internal inspection reports, and the internal defect can be predicted by considering DGA.

요 약

전력용 변압기의 결함을 검출하고, 고장을 예방하기 위해 유중가스분석 방법이 정기적으로 수행되고 있다. 유중가스분석방법에 의해 변압기 내부의 과열 또는 방전 현상의 발생은 확인할 수 있지만 결함 부위는 내부점검에 의하여 판별하여야 한다. 하지만, 권선 또는 철심 결함은 내부점검으로 확인할 수 없어 DGA만으로는 조치방안을 수립하기가 불가능하다. 본 논문에서는 변압기 내부점검 보고서를 바탕으로 내부 결함 모드를 분석하여 제시하고, DGA에 의한 판별법을 고려하여 내부 결함을 예측할 수 있도록 하였다.

Key words : Power Transformer, DGA, Internal Defect, Fault, Outage

1. 서론

1960년대 이후 급속한 산업발달로 인하여 전력설비의 설치 및 용량이 급격히 증가하였으며 현재 많은 설비들이 노후화되고 있다. 이러한 전력설비 중에서 전력용 변압기는 수요설비의 증가에 맞추어 대형화 및 초고압화로 예기치 않은 고장은 막대한 경제적 손실을 유발하게 된다. 안정적인 전력 공급을 위해서는 이러한 전력 설비의 건전성을 확인하고, 고장을 미연에 방지할 수 있는 진단기법이 요

구된다. 유중가스분석(Dissolved Gas Analysis : DGA)은 변압기 결함을 검출하고, 고장을 예방하는데 가장 널리 이용되는 기술이다. DGA는 1960년대에 도입되어 변압기 진단에 효과적인 방법으로 인정받아 1970년대에 본격적으로 적용되었으며, 현재 전 세계적으로 대용량 변압기는 유중가스분석을 정기적으로 수행하고 있다. 유중가스분석을 통해 변압기의 이상 유무를 진단하는 방법으로는 Key gas 판별법, IEC 판별법, Rogers 판별법, Donernberg 판별법, Duval Triangle 판별법 등이 연구되었다[1]-[4].

* Dept. of Electrical & Control Engineering, Mokpo National University

★ Corresponding author

E-mail : tspark@mokpo.ac.kr, Tel : +82-61-450-2465

※ Acknowledgment

This paper was supported by Research Funds of Mokpo National University in 2018

Manuscript received Mar. 16, 2020; revised Mar. 18, 2020; accepted Mar. 20, 2020.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

각각의 판별법은 절연유에 포함된 가스의 농도 및 비율을 이용하여 변압기 내부에서 과열 또는 방전이 발생하였는지를 진단하지만, 진단 기준이 조금씩 차이를 보이고 있어 서로 다른 진단 결과를 보이거나 또는 진단을 판정할 수 없는 불능 영역이 존재한다. 또한 진단 결과로 변압기 내부 결함에 의한 이상 유무와 심각성을 판별할 수는 있으나, 결함 부위와 유형에 대하여 알 수 없으므로 변압기 내부 점검을 시행하여 결함을 확인하게 된다. 결함이 확인되면 결함을 수리하여 계속 운전하거나 수리 불가능 또는 수리 비용이 많이 소요될 경우에는 변압기를 폐기한다.

하지만, 변압기 내부 점검에서 결함이 확인되지 않는 경우에는 변압기의 계속 운전 또는 폐기를 결정하기 어렵다. 본 논문에서는 변압기의 내부 구조와 결함 유형을 분석하고, DGA의 진단 결과를 이용하여 내부점검에서 결함을 파악할 수 없는 경우의 판단 기준을 제시하고 사례분석을 통해 그 효용성을 확인한다.

II. 본론

1. 변압기 유중가스분석방법

유입변압기는 과부하 또는 고장으로 인하여 발생하는 열 또는 방전에 의해 다양한 가스를 발생시킨다. 절연유는 150°C에서 500°C에서 분해하면 H₂와 CH₄와 같은 저분자량 가스가 상대적으로 많이 생성되고, 미량의 고분자량 가스인 C₂H₄ 및 C₂H₆이 생성된다. 중온 과열에서 H₂ 농도는 CH₄의 농도를 초과하지만, 고분자량 가스인 C₂H₆과 C₂H₄가 상당부분 동반된다. 고온 과열에서는 H₂ 및 C₂H₄ 양이 증가하며 C₂H₂가 생성될 수 있다. 부분 방전 및 매우 낮은 레벨의 간헐적 아크와 같은 저강도 방전은 주로 H₂를 생성하며, 미량의 CH₄ 및 C₂H₂를 생성한다. 방전의 강도가 증가함에 따라 C₂H₂ 및 C₂H₄ 농도가 현저하게 상승한다. 700°C에서 1,800°C까지의 아크 방전은 C₂H₂의 양이 두드러지게 나타난다. 다음은 DGA를 이용하여 변압기의 결함 유형을 판별하는 대표적인 판별법의 진단 기준을 제시한다.

가. Key gas 판별법 : 절연유 및 절연지 분해에 의해 발생하는 가스 중에서 우세한 가스를 이용하여 결함 유형을 제시한다.

Table 1. Key gas method.

표 1. Key gas 판별법

Defect type	Key gas
Thermal Oil	C ₂ H ₄ , CH ₄
Thermal Cellulose	CO, CO ₂
Partial Discharge	H ₂
Discharge	C ₂ H ₂ , H ₂

나. Rogers 판별법 : 유중가스 중의 5가지 가스의 성분 비를 이용하여 결함 유형을 제시한다.

Table 2. Rogers method.

표 2. Rogers 판별법

Defect type	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
Partial discharge	<0.1	<0.1	<1.0
Discharge	0.1~3.0	0.1~1.0	>3.0
Thermal < 300oC	<0.1	0.1~1.0	1.0~3.0
Thermal < 700oC	<0.1	>1.0	1.0~3.0
Thermal > 700oC	<0.1	>1.0	>3.0

다. Duval Triangle 판별법 : CH₄, C₂H₄, C₂H₂의 성분비를 계산한 후 삼각법에 의해 결함유형을 제시한다. Duval Triangle 판별법은 결함 유형을 시각화 할 수 있어 쉽게 구분할 수 있으며 결함의 진전을 추적하기 편리하다.

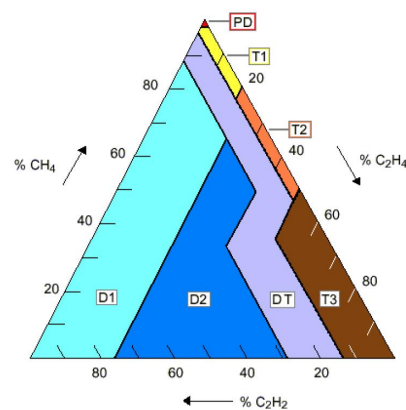


Fig. 1. Duval Triangle method.

그림 1. Duval Triangle 판별법

라. IEC 60599판별법 : IEC는 1978년 변압기 사용자의 경험을 기반으로 IEC599를 제정 후, 이를 보완하여 1999년 15개 전력회사, 15,000대 변압기에서

수집한 DGA 데이터를 기반으로 IEC 60599를 제정하였고 2015년 25개 전력회사, 20,000대 변압기의 데이터를 분석하여 농도 레벨을 보완하였다.

Table 3. IEC 60599 method.

표 3. IEC 60599 판별법

Defect type	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
Partial discharge	NS	<0.1	<0.2
Discharge low energy	>1	0.1-0.5	>1
Discharge high energy	0.6-2.5	0.1-1	>2
Thermal < 300oC	NS	>1 but NS	<1
Thermal < 700oC	<0.1	>1	1-4
Thermal > 700oC	<0.2	>1	>4

마. 일본전기협동연구 가스 패턴 진단법 : 1996년에서 2006년까지 변압기 내부를 점검하여 결함이 발견된 변압기 59대, 보호계전기 동작으로 결함이 발견된 변압기 36대의 DGA 데이터를 분석하여, 변압기 고장 유형에 따른 주도형 가스를 도출하고 특징 가스를 정리하였다. 이때 가스 패턴에 의한 진단 방법 가로축에 H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 의 순서로 가스 성분을 놓고, 세로축은 상기 가스 성분 중 최대의 것을 1.0으로 했을 경우의 조성비 패턴도를 그려, 그 형상으로 이상의 내용을 진단한다. 가스패턴에 의한 진단법은 1980년대부터 사용되고 있으며 실용성이 높다. 결함 변압기의 유형별 가스 패턴은 다음과 같다.

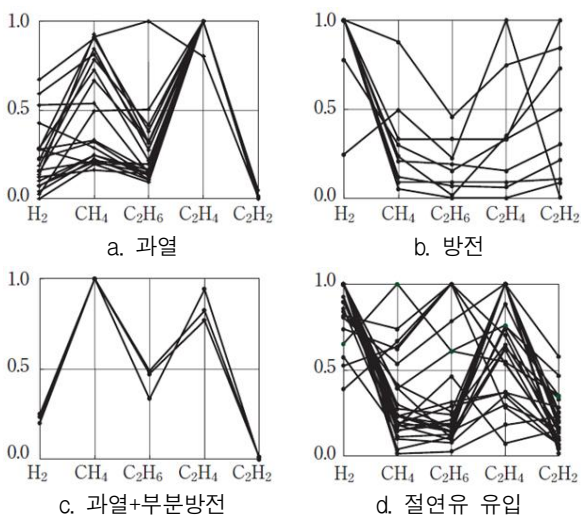


Fig. 2. Gas patterns for Defect types.

그림 2. 결함유형별 가스 패턴

2. DGA를 고려한 변압기 결함 유형 분석

전력용 변압기의 결함을 확인하고 고장을 방지하기 위하여 다양한 유증가스분석법이 개발되어 사용되고 있다. 한전에서는 모든 전력용 변압기를 대상으로 매년 DGA를 분석하고, 가스의 농도가 기준치를 초과할 경우 DGA 분석법에 따라 결함의 종류를 판별하고 변압기 내부를 점검한다. 1998년부터 2016년까지 DGA 결과에 따라 변압기 내부를 점검한 변압기 293대 중에서 결함을 확인한 변압기는 141대이고, 결함을 확인하지 못한 변압기는 152대로 조사되었다. 이와 같이 변압기 내부의 결함을 확인하지 못한 경우에는 변압기를 계속 운전할 것인지, 폐기할 것인지를 결정하는 것이 매우 중요하다. 따라서 변압기의 구조를 분석하고 국내외 문헌에서 연구된 변압기 고장모드분석 FMEA(Failure Mode Effect Analysis)를 이용하고, 한전에서 운용 중인 변압기 내부 점검 보고서를 바탕으로 변압기 내부 결함의 발생 부위, 결함 원인, 결함 현상 등의 내부 결함 분석을 제시하였다.

Table 4. Internal defects anlysis.

표 4. 내부 결함 분석

Defect Parts	Detailed parts	Cause	Symptoms
winding	Insulation	Degradation	Discharge, Thermal
	Lead	Degradation	Discharge, Thermal
Core	Steel Insulation	eddy current loss, leakage flux	Thermal
	Ground	Multiple grounds	Thermal
Clamp	Pressure Ring	Loose of bolts	Discharge
Oil		Uninhibited	Oxidation
Bushing	Corona Shield		Discharge
	Terminal	Loose of bolts	Thermal
OLTC	Diverter S/W	Crack	Discharge
	Tap Selector	Loose of bolts	Thermal
		wear	

표 4 에서 제시된 내부 결함 유형 중에서 권선 절연불량과 철심 과열의 경우 내부 점검시에 육안으로 흔적을 발견하기 어렵다. 결함 중에서 고장으로 진전되는 결함과 고장으로 진전되지 않고 가스만 발생하는 결함으로 분류할 수 있으며, 권선 절

연 불량에 의한 방전은 고장으로 진전될 가능성이 매우 높아 빠른 조치가 필요하다. 하지만 철심의 누설자속, 와류손 등에 의한 과열은 변압기의 고장으로 진전되지 않기 때문에 즉각적인 조치를 필요로 하지 않고 지속적으로 가스의 상태 변화를 관찰하는 것으로 충분하다.

3. 사례 분석

다음은 한전에서 운용중인 변압기의 DGA 분석 결과 이상 판정으로 내부점검을 실시하였으나 결함을 확인하지 못한 사례에 대한 분석결과이다.

가. 사례분석 1

- 설비내역 : 154kV, 2005년 제작
- 점검일시 : 2012년 6월

Table 5. DGA of Case study 1 Transformer.

표 5. 사례분석 1 변압기의 DGA

H ₂	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CH ₄	Results
26	0	103	755	104	Abnormal

Table 6. IEC 60599 results of Case study 1 - Thermal Low.

표 6. 사례분석 1의 IEC 60599 판정결과 - 저온과열

Defect type	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
Partial discharge	NS	<0.1	<0.2
Discharge low energy	>1	0.1-0.5	>1
Discharge high energy	0.6-2.5	0.1-1	>2
Thermal < 300oC	NS	>1 but NS	<1
Thermal < 700oC	<0.1	>1	1-4
Thermal > 700oC	<0.2	>1	>4

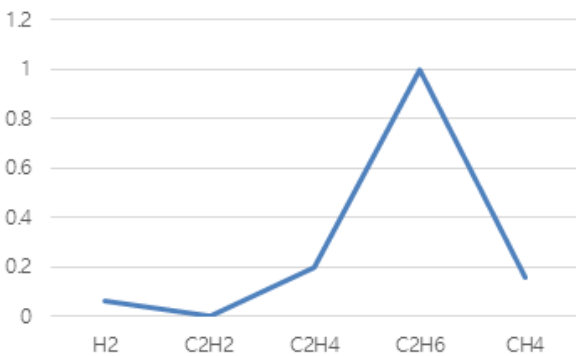


Fig. 3. DGA gas pattern analysis of transformer.

그림 3. 변압기 DGA 가스 패턴 분석

○내부점검 전후 DGA 이력

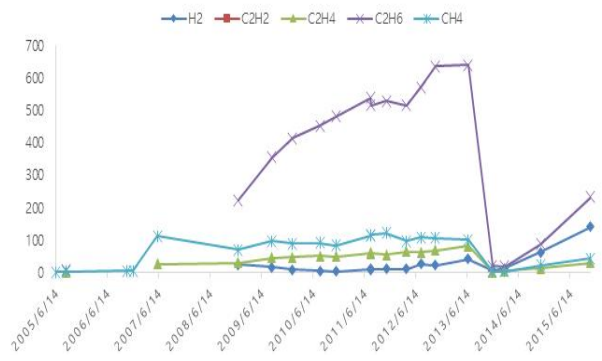


Fig. 4. DGA history of transformer.

그림 4. 변압기 DGA 이력

이 변압기는 장시간 C₂H₆가 점차적으로 증가하였으나 내부 점검 결과 이상 부위를 확인할 수 없어서 오일 필터링 후 재가동하였다. 이후에도 C₂H₆가 점차 증가하는 패턴을 보이고 있으며 동일한 시기에 제작된 변압기에서 모두 동일한 현상이 발생하여 내부점검을 시행하였으나 이상 부위를 확인할 수 없었다. 표 4의 내부결함 중에서 과열이 발생하고 이상 부위를 확인할 수 없는 부위는 철심이므로, 이 사례의 변압기는 철심의 구조적 결함에서 발생한 과열로 판별된다.

나. 사례분석 2

- 설비내역 : 154kV, 1998년 제작
- 점검일시 : 2012년 6월

Table 7. DGA of Case study 2 Transformer.

표 7. 사례분석 2 변압기의 DGA

H ₂	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CH ₄	Results
141	55	487	127	221	Caution II

Table 8. IEC 60599 results of Case study 1 - Thermal High, Arc.

표 8. 사례분석 2의 IEC 60599 판정결과 - 고온과열아크

Defect type	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
Partial discharge	NS	<0.1	<0.2
Discharge low energy	>1	0.1-0.5	>1
Discharge high energy	0.6-2.5	0.1-1	>2
Thermal < 300oC	NS	>1 but NS	<1
Thermal < 700oC	<0.1	>1	1-4
Thermal > 700oC	<0.2	>1	>4

이 변압기는 정상 운전 중 급격히 C_2H_4 와 C_2H_2 가 증가하여 요주의 II 판정을 받고 내부 점검을 실시 하였으나 이상 부위를 확인할 수 없었다. 오일 필터링 후 재가동하였으나 10개월 후 가스의 급격한 증가로 위험 판정을 받았고, 내부점검을 실시하였으나 역시 이상 부위를 확인할 수 없었다.

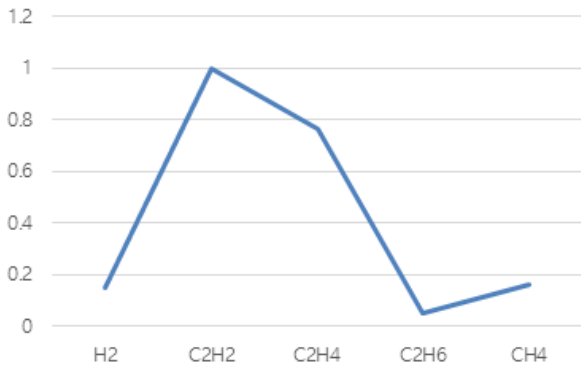


Fig. 5. DGA gas pattern analysis of transformer.
그림 5. 변압기 DGA 가스 패턴 분석

○ 내부점검 전후 DGA 이력

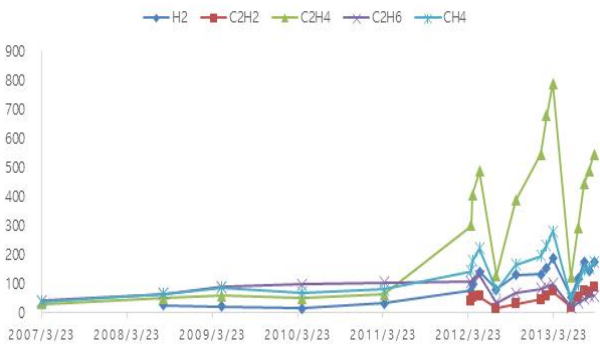


Fig. 6. DGA history of transformer.
그림 6. 변압기 DGA 이력

표 4의 내부결함 중에서 과열 및 방전이 발생하고 이상 부위를 확인할 수 없는 부위는 권선이고, 이 사례의 변압기는 권선 내부 고온 과열로 인하여 절연이 파괴되고 있는 상태에서 아크가 발생한 것으로 추정되며, 계속 운전할 경우 심각한 고장으로 진전될 것으로 판단된다.

III. 결론

유증가스분석(DGA)는 전력용 변압기의 결함을 판별하고 고장을 방지하기 위해 전 세계적으로 사용되고 있는 방법이다. 한전에서 매년 전력용 변압기의 DGA를 시행하고 있으며, 판정 결과에 따라 내부점검 등의 조치를 수행하고 결함 부위를 수리한다. 하지만 DGA 진단법으로는 내부 결함의 유형만을 판단할 수 있고, 내부점검에서 결함 부위를 확인하지 못하는 경우에는 변압기를 계속 운전할 것인지 폐기할 것인지를 결정해야 한다. 본 논문에서는 한전의 변압기 내부점검 결과를 바탕으로 변압기의 내부 결함 부위와 결함 원인 및 현상을 분석하였다. 이에 따라 변압기의 DGA 분석 결과를 바탕으로 내부 점검시 결함 부위를 예측하고 결함이 확인되지 않은 경우의 조치 계획을 수립할 수 있다.

References

[1] IEEE Std C57.104-2008, "IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil- Immersed Transformers," 2008.
DOI: 10.1109/IEEESTD.2019.8890040

[2] IEC Publication 60599, "Mineral Oil-Filled Electrical Equipment in Service-Guidance on the Interpretation of Dissolved and Free Gases Analysis," 2015.

[3] D. J Kweom, J. S Kwak, J. Y Eun, B. M Min, D. G Yu, "Investigation Between Gas in Oil Analysis and the Source of Trouble in Transformer," *Journal of Electrical Engineering and Technology*, Vol.54, No.8, pp.343-349, 2005.

[4] M. Duval, "A Review of Faults Detectable by Gas-in-Oil Analysis in Transformers," *IEEE Electrical Insulation Magazine* Vol.18, No.3, pp.8-17, 2002. DOI: 10.1109/MEI.2002.1014963

BIOGRAPHY

Seong-Hwan Kim (Member)

1991 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.
1995 : MS degree in Electrical Engineering, Korea University.
1998 : PhD degree in Electrical Engineering, Korea University.
1999~ : Professor, Mokpo National University

Tae-Sik Park (Member)

1994 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.
1996 : MS degree in Electrical Engineering, Korea University
2000 : PhD degree in Electrical Engineering, Korea University.

2000~2004 : Research Engineer, Samsung Electronics.

2005~2013 : Administrative Official at Korea Intellectual Property Office

2013~ Professor, Mokpo National University