

통계적 퍼지 함수를 이용한 전력용 변압기 유중가스 판정 시스템

(Dissolved Gas Analysis Interpretation System
for Power Transformers using Statical Fuzzy Function)

조성민* · 김재철* · 신희상* · 권동진** · 구교선**

(Sung-Min Cho · Jae-Chul Kim · Hee-Sang Shin · Dong-Jin Kweon · Kyo-Sun Koo)

(송실대학교* · 전력연구원**)

Abstract

Dissolved gases analysis (DGA) is one of the most useful techniques to detect incipient faults in power transformers. Criteria interpreting DGA result is the most important. Because of difference of operation environment, construction type, oil volume, and etc, the interpretative criteria of DGA at KEPCO must be different with other standard like IEC-60599, Rogers and Doernenburg. In this paper, we collected the DGA data of the normal condition transformers and the incipient fault transformer to suggest the most appropriate criteria. Using these data, this paper suggests appropriate condition classification algorithm. Suggested algorithm can help to detect incipient fault earlier without unnecessary sampling.

1. 서론

문명의 발달과 함께 전력의 사용량은 계속 증가하였다. 그로 인해 안정적인 전력의 공급은 더욱 중요시 되고 있다. 전력 시스템의 많은 구성 요소 중 전력용 변압기는 그러한 안정적인 전력의 공급을 위해 매우 중요한 설비중 하나이다. 이러한 중요성 때문에 전력용 변압기의 고장을 초기에 발견하여 보수하기 위한 많은 진단 기법들이 발표되고 사용 중에 있다.

유중가스분석 기법은 전력용 변압기의 내부 고장을 초기에 발견하기 위해 아주 널리 사용되는 기법이다. 전력용 변압기의 내부에 과열과 방전등의 고장 징후가 발생하면 그 에너지에 따라 절연유의 성분을 변화 시켜 절연유에 탄화 수소계 가스를 증가 시킨다. 이 가스를 분석하면 변압기의 상태를 진단할 수 있다.

정상적인 변압기의 운전에서도 어느 정도의 가스가 발생 할 수 있다. 즉, 정상적인 변압기에서도 가스가 검출이 된다. 그러므로 정상적인 변압에서 발생 할 수 있는 가스양을 고려하여 정상적인 변압기와 고장이 발생한 변압기를 가스양을 고려하여 분류하는 기준은 매우 중요하다. IEEE C57.104

와 IEC60599와 같은 기준들이 제정 되어 있지만 같은 고장에서도 절연유의 부피, 상용 전압, 내부 구조, 운전 환경 등의 특징에 의해 발생하는 가스의 양은 다르게 나타날 수 있고 측정 하는 방법 등의 특성에 의해서도 다르게 나타날 수 있다. 그러므로 이미 제시된 기준을 사용 하는 것 보다는 국내 전력용 변압기의 가스 분석의 특징을 고려하여 정상인 변압기와 고장이 발생한 변압기를 구분해내는 적절한 방법이 필요하다.

본 논문에서는 한전 전력용 변압기의 유중가스 분석 기록을 수집하고 통계적으로 분석하여 퍼지 함수로 적용한 새로운 유중가스분석 판정 시스템을 제시한다.

2. 유중가스 분석의 기준들

2.1. 한국전력공사의 기준

한전은 1982년부터 가스분석을 실시하여 1985년에 한전 자체의 가스분석 판정기준을 최초로 제정하여 1998년과 2002년에 개정을 통해 현재의 기준에 이르고 있다. 표 1은 현재의 한전 전력용변압기 가스 분석 판정 기준을 나타내고 있다.

표 1. 한전의 가스분석 판정 기준

Table 1. DGA decision criteria at KEPCO

구분	요주의 (Caution)		이상 (Abnormal)		위험 (Danger)	
	200kV 이하	345kV 이상	200kV이하	345kV이상	200kV 이하	345kV 이상
H ₂	400~800		801~1,200		1,200~	
CO	400~700	350~600	701~1000	601~800	1,000~	800~
C ₂ H ₂	25~80	20~60	81~150	61~120	150~	120~
CH ₄	250~750		751~1,000		1000~	
C ₂ H ₄	300~750		751~1,000		1000~	
C ₂ H ₆	250~750		751~1,000		1000~	
C ₃ H ₈	250~750		751~1,000		1000~	
T.C.G	1,000~2,500		2,501~4,000		4,000~	
T.C.G 증가량	정상상태에서 200/월 이상		요주의상태에서 200/월 이상		이상상태에서 300/월 이상	

2.2. IEEE C57.104

표 2는 7종의 가스와 전체 가연성 가스의 양 (TDCG, Total Dissolved Combustible Gases)으로 판정하는 IEEE의 가스 기준 농도를 나타낸다. Condition 1 기준치 이하의 가스양은 정상적인 변압기의 운영을 의미한다. Condition 2 기준치 범위의 가스양이 검출되면 가스 증가량을 분석하기 위해 추가적인 분석을 시행해야 하며 Condition 3 기준치 범위의 가스양의 검출은 Condition 2보다 많은 레벨의 분해를 의미한다. Condition 4기준치 초과는 변압기를 계속적으로 운영하면 고장이 발생 할 수 있다는 것을 의미 한다. 따라서 Condition 1인 경우에는 추가적인 조치를 하지 않는다. 하지만 Condition 2~4인 경우에는 추가적인 분석을 실시하며 감시한다.

표 2. IEEE의 가스분석 판정 기준

Table 2. DGA decision criteria of IEEE

Gases	C1	C2	C3	C4
H ₂	~100	101~700	701~1800	1800~
CH ₄	~120	121~400	401~1000	1000~
C ₂ H ₂	~35	35~50	51~80	80~
C ₂ H ₄	~50	51~100	101~200	200~
C ₂ H ₆	~65	66~100	101~150	150~
CO	~350	351~570	571~1400	1400~
CO ₂	~2500	2500~4000	4001~10000	10000~
TCG	~720	721~1920	1921~4630	4630~

*C1 : Condition1, C2 : Condition2,
C3 : Condition3, C4 : Condition4

2.3. IEC60599

IEC60599에서는 15,000대 이상의 전력용 변압기에서 조사된 Typical Concentraion Value(90%)를 나타내어 이 기준을 초과하면 분석주기를 단축하거나 다른 테스트를 하거나 또는 즉각적인 조치를 취하도록 권하고 있다. 이 Typical Concentration Value(90%)는 확률적으로 조사된 변압기의 고장이 일어나지 않을 확률이 90%라는 것이다. 즉 이 조건에서 조사된 변압기의 10%가 고장이 일어났다는 것을 의미한다. <표 1.4>는 IEC60599의 Typical Concentration Value(90%)를 나타내고 있다.

표 3. IEC60599의 가스분석 판정 기준

Table 3. DGA decision criteria of IEC60599

Gases	NO OLTC	communicating OLTC
H ₂	60-150	75-150
CO	540-900	400-850
CO ₂	5100-13000	5300-12000
CH ₄	40-110	35-130
C ₂ H ₆	50-90	50-70
C ₂ H ₄	60-280	110-250
C ₂ H ₂	3-50	80-270

2.4. 일본전기협동 연구회 기준

일본의 변압기 절연유 가스분석 판정기준은 변압기 전압이나 용량에 따른 가스 발생량의 차이는 없다고 보고, 500kV와 275kV 변압기의 전압별 판정기준치의 구분은 두지 않고 있다.

“요주의 I”단계는 이상하다고는 단정 할 수 없지만, 정상 상태에서부터 이탈해 어떠한 내부 변화가 있다고 판정되는 레벨이다. “요주의 II”레벨은 내부 이상의 특징 가스인 C₂H₄ 와 C₂H₂에 주목해, 여기에 TCG를 고려해 판정하고, 변압기 내부에 이상의 징후가 있는 것으로 판단할 수 있는 레벨이다. “이상” 레벨은, “요주의 II” 레벨에서 이상의 정도가 더욱 진전해, 특징 가스(C₂H₄, C₂H₂)량이 증가해, 변압기 내부에 이상이 분명하게 발생하고 있다고 판정할 수 있는 레벨로 한다. 표 4는 일본 전기 협동 연구회의 가스분석 판정 기준을 나타낸다.

표 4. 일본전기협동 연구회의 가스 판정기준
Table 4. DGA decision criteria in Japan

요주의 I	H2	CO	C2H2	CH4	C2H4	C2H6	TCG
	~400	~300	~0.5	~100	~10	~150	~500
요주의 II	① C2H2 ≥ 0.5						
	② C2H4 ≥ 10, TCG ≥ 500						
이상	① C2H2 ≥ 5						
	② C2H4 ≥ 100 and TCG ≥ 700						
	③ C2H4 ≥ 100 and TCG 증가량 ≥ 70/月						

이상에서 알 수 있듯이 각각 기준을 제정하는 곳마다 기준 값이 다르다. 또한 이런 명확한 기준값을 정하여 사용하는 것은 경계값 주변에서 모호성을 갖는다. 예를 들면 한전의 기준에서 수소가스는 400ppm이 기준이어서 398ppm은 정상으로 판정하고 402ppm은 요주의로 판정하게 된다. 이러한 점을 개선하기 위해 한전 변압기들의 자료를 통계적으로 분석하여 적절한 퍼지 함수를 사용하여 상태 판정 알고리즘을 제시하였다.

3. 통계적인 분석 결과

정상적인 상태임이 확인된 변압기의 유증가스분석의 결과와 고장의 징후가 발견된 변압기의 유증가스분석의 결과 값을 통계적으로 분석하여 한전 변압기에 가장 적합한 판정을 내리도록 하였다.

그림 1은 정상적인 변압기와 고장 징후가 발견된 변압기의 수소가스의 누적 분포 함수를 나타내고 있다. 그래프의 값에 따르면 정상적인 변압기의 81%는 수소가스가 발생하지 않고 정상적인 변압기는 약 160ppm정도 까지 발생하는 것을 알 수 있다.

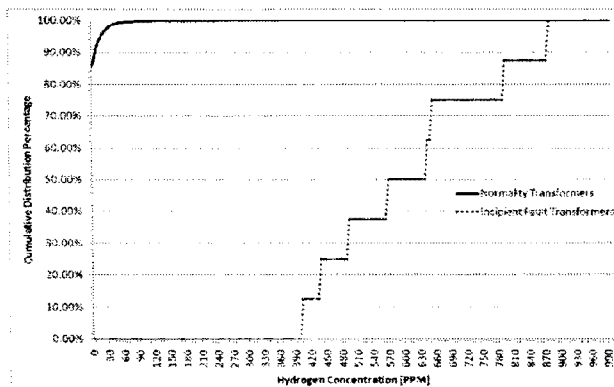


그림 2 수소 가스의 누적 분포
Fig. 2 Cumulative distribution curve of Hydrogen

이런 누적 분포의 정보를 퍼지 함수에 대입하기 위해 weibull 함수를 사용하여 수식화 하였다.

$$Weibull = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^m} \quad (1)$$

수식 1은 weibull 함수의 수식을 나타낸다. 여기서 x는 가스의 양이 되며 η는 scale 지수이고 m은 shape 지수이다. 각각의 가스의 누적 분포 함수는 weibull 확률지 방법을 사용하여 weibull함수로 수식화 하였다.

4. 퍼지 함수를 적용한 판정 시스템

앞 절에서 구해진 weibull함수를 퍼지 함수로 사용하여 변압기의 상태를 판정 하도록 하였다. 고장 징후가 발견된 변압기의 누적분포 함수는 weibull 누적 분포 함수로 수식화 하고 그 수식을 퍼지 함수로 사용하여 가스량이 입력되면 고장에 대한 소속도를 나타내는 함수로 사용 하였다. 정상 변압기의 누적 분포 함수는 가스가 발생하지 않은 부분은 제외 하고 가스가 발생한 영역을 weibull 함수로 수식화 하여 1에서 그 함수 값을 뺀 값을 소속도 값으로 나타내도록 사용하였다. 이렇게 하여 가스별로 수식 (2)과 (3)와 같은 고장에 대한 퍼지 함수와 정상에 대한 퍼지 함수를 정의 하였다.

$$\mu_{H2\text{정상}} = e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^m} \quad (2)$$

$$\mu_{H2\text{고장}} = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^m} \quad (3)$$

변압기의 정상에 대한 지수와 고장에 대한 지수는 아래의 수식 (4)와 (5)에서 나타낸 것과 같이 퍼지 함수의 퍼지 교집합과 합집합을 통해 구하고 정상 지수와 고장 지수의 크기에 의해 고장과 정상으로 변압기의 상태를 판정 하도록 하였다. 즉, 정상 지수가 고장 지수보다 크면 변압기의 상태를 정상으로 판정 하고 고장지수가 정상 지수보다 크면 고장으로 판정 하였다.

$$\text{정상 지수} = \mu_{H2\text{정상}} \wedge \dots \wedge \mu_{CH4\text{정상}} \quad (4)$$

$$\text{고장 지수} = \mu_{H2\text{고장}} \vee \dots \vee \mu_{CH4\text{고장}} \quad (5)$$

5. 사례연구

본 논문에서 제시하는 판정 시스템을 기존의 기준들과 비교하기 위해 실제 유증가스분석의 데이터를 적용 하였다. 표 5는 실제 변압기 내부에서 방전으로 인한 탄화 흔적이 발견된 변압기의 가스분석 결과를 나타내었다.

표 5 사례 연구의 데이터

Table 5 Data of case study

가스분석	H ₂	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CH ₄	CO
결과	100	25	2	1	3	202
실 변압기 상태	내부 방전으로 인한 탄화 흔적 발견					

위의 사례 연구의 데이터를 제시한 시스템에 적용한 결과 상태 지수가 음수로 고장 지수가 정상 지수보다 큰 것으로 나타나 고장 징후가 발생 한 것으로 판정 하였다. IEEE와 IEC의 기준은 정상 상태로 판정하게 되어 제시된 판정 시스템이 국외 기준 보다 국내 변압기에 적절함을 알 수 있다.

표 6 사례연구의 판정 결과들

Table 6 Decision results of criteria

기준	제시한 시스템	IEEE C57.104	IEC-60599
판정 결과	상태 지수 -0.075 (고장 징후 발생)	normal (정상 상태)	typical value (정상 상태)

6. 결론

본 논문에서는 국내 변압기의 유증가스분석의 결과를 수집하고 통계적으로 분석하여 그 결과를 퍼지 함수로 사용하는 상태 판정 시스템을 제시하였다. 제시된 시스템이 퍼지 함수를 사용하여 기존의 명확한 기준 값에 의해 판정하는 기준 보다 고장과 정상에 대한 정도를 나타내어 변압기의 상태를 파악하는데 도움을 주고 사례 연구를 통해 IEEE와 IEC의 기준 보다는 국내의 변압기에 적절한 판정을 내리는 것을 확인 하였다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 학술용역 지원으로 수행 되었고 관계 부처에 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) M. Duval, "Dissolved gas analysis : It can save your transformer", IEEE electrical insulation magazine, Vol. 5, No. 6, pp.22~27, Nov.-Dec. 1989
- (2) "IEEE Guide for the interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers", IEEE Std C57.104-1991 (ANSI)
- (3) "Mineral oil-impregnated electrical equipment in service - Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis", IEC60599, 1999
- (4) Electric Technology Research Association, "Maintenance control of oil-filled transformer", Electric Cooperative Research Report, Vol54, No. 5, Feb., 1999
- (5) Michel Duval, Alfonso dePablo, "Interpretation of Gas-In-Oil Analysis Using New IEC Publication 60599 and IEC TC 10 Database", IEEE Electrical Insulation Magazine Vol 17, No 2, 2001
- (6) "Power Transformers Operation Manual," KEPCO Department of Trans, pp.1~43, 2002
- (7) 이광형, 오길록, "퍼지 이론 및 응용", 홍릉과학출판사