

# 유중 가스 분석법을 이용한 전력용 유압 변압기의 고장 진단

\*윤용한, 김재철  
송실대학교 전기공학과

## A Fault Diagnosis of Oil-Filled Power Transformers Using Dissolved Gas Analysis

\*Yong-Han Yoon, Jae-Chul Kim  
Department of Electrical Engineering, Soongsil University

**Abstract** - This paper presents an artificial neural network approach to diagnose and detect faults in oil-filled power transformers based on dissolved gas analysis. The proposed algorithm is used to detect faults with or without cellulose involved. Several neural network topologies have been considered. Good diagnosis accuracy is obtained with the proposed approach.

### 2. 유중 가스 분석법

전력용 유압 변압기 내부에서 이상(부분 방전, 아크 방전, 국부 과열 등)이 생기면 반드시 열 발생이 수반된다. 이때 열원에 접촉된 절연 재료는 열 분해되어 각종 절연 탄화물과 H<sub>2</sub>(수소), CH<sub>4</sub>(메탄), C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>(아세틸렌), C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>(에틸렌), C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(에탄), CO(일산화탄소), CO<sub>2</sub>(이산화탄소), O<sub>2</sub>(산소), N<sub>2</sub>(질소) 등의 가스가 발생하며, 각 발생 가스는 대부분 절연유중에 용해된다. 그러므로 전력용 변압기에서 절연유를 채취하여 유중 가스를 분석하면 발생 가스 및 가스 발생량의 조성에 따라 내부 이상 유무 및 그 정도를 추정할 수 있다. 유중 가스 분석법을 이용한 전력용 유압 변압기 고장 진단 방법으로는 다음과 같은 것이 대표적이다.

### 1. 서론

전력용 유압 변압기의 고장 진단 방법으로써 유중 가스 분석법은 절연유중에 용해되어 있는 가스의 분석으로 변압기 내부의 고장 유무 및 고장의 종류를 진단하는 방법으로 1960년대에 연구가 추진되어 1970년대에 실용화 되었으며, 현재 세계적으로 널리 이용되고 있다.[1-5] 그러나 유중 가스 분석법은 전력용 변압기에 적용하는 고장 판정 기준과 진단 결과에 영향을 미치는 요인이 매우 다양하기 때문에 현재에도 전문가에 의한 경험적인 판단으로 처리되고 있다. 또한 지금까지 연구된 결과들은 전력용 변압기의 고장 진단에 관련된 수학적인 절대 기준을 사용하는 모순이 있으며, 이를 극복하기 위한 지능적인 접근 방법(퍼지 전문가 시스템 및 신경 회로망)에서는 고장 진단 전문가가 결정해야 할 파라미터가 다수 존재하는 문제점이 노출되고 있다.[6-9]

따라서 본 논문에서는 신경회로망의 적용으로 변압기 유중 가스 분석 자료와 고장에 관련된 특징을 학습시킨 전력용 유압 변압기의 새로운 고장 진단 방법을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 신경회로망을 이용한 고장 진단 방법(유중 가스 분석)은 입력으로 가스 구성비 분석(IEC 기준) 및 주요 가스 분석(한전 기준) 자료를 채택하였다. 또한, 출력으로 전력용 유압 변압기의 고장 및 절연물 탄화 유무의 특징을 신경회로망으로 추출하였다. 따라서 입력된 유중 가스 분석 결과에 따라 전력용 유압 변압기의 진단 결과가 제시 되도록 구성하였다. 제안된 신경회로망을 이용한 변압기 고장 진단 방법은 전력용 유압 변압기의 유중 가스 기록으로 효용성을 검토하였다.

### 2.1 가스 구성비를 이용한 분석

유중 가스 분석법에서 가스 구성비를 이용하는 분석 방법은 매우 다양하지만 대표적으로 사용되는 것은 IEC[3], Rogers[2], Dornenburg[2] 기준 등이 있다. IEC 기준은 그 중에서도 가장 일반적으로 사용되고 있는 것으로 5개의 유중 가스로 조합한 3종류의 가스 구성비를 사용한 것이며, 가스 성분의 비율(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)에 따라 코드를 부여한 후 고장(이상)의 종류를 결정하는 방법으로 진단 유형의 종류는 총 9종이다. 진단 내용의 종류로는 크게 경년 열화(정상), 부분 방전(방전 사고), 아크 방전(방전 사고), 과열(온도 사고)로 나눌 수 있다. 이 방법은 이상의 유형을 설명할 수 있는 기준이 다양하다는 것에 장점이 있다. 표 1은 가스 구성비 이용한 분석에 따른 IEC의 기준을 나타내고 있다.

### 2.2 주요 가스를 이용한 분석

전력용 유압 변압기에서 내부 사고가 발생하는 요인은 절연유 과열, 유중 아크 분해, 고체 절연물 과열 및 고체 절연물 아크 분해 등을 생각할 수 있다. 일반적으로 이와 같은 고장에 따른 발생 가스는 표 2와 같다. 표 2의 내용을 근거로 나타낸 기준은 한전에서 사용하는 것으로 주요 가스 분석에 따른 방법을 사용하고 있다. 이 방법은 발생 가스의 성분을 조사함으로써

써 고장 판정이 용이하다는 것에 장점이 있다.

표 1. 가스 구성비 분석에 따른 IEC의 기준

가스 구성비의 범위(ppm/ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
< 0.1	0	1	0
0.1 ~ 1.0	1	0	0
1.0 ~ 3.0	1	2	1
> 3.0	2	2	2

경우	고장 종류	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
0	경년 열화 (정상)	0	0	0
1	저 에너지 부분 방전	0	1	0
2	고 에너지 부분 방전	1	1	0
3	저 에너지 아크 방전	1, 2	0	1, 2
4	고 에너지 아크 방전	1	0	2
5	과열(< 150°C)	0	0	1
6	과열(150°C ~ 300°C)	0	2	0
7	과열(300°C ~ 700°C)	0	2	1
8	과열(> 700°C)	0	2	2

표 2. 주요 가스 분석에 따른 한국 전력 공사의 기준

주요 가스	고장 종류
H <sub>2</sub>	부분 방전
CO & CO <sub>2</sub>	고체 절연물 분해
CH <sub>4</sub> & C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	과열(저온)
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	아크 방전
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	과열(고온)

단위 (ppm)	정상	요주의	고장
H <sub>2</sub>	< 400	400~800	> 800
CO	< 300	300~800	> 800
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	< 20	20~100	> 100
CH <sub>4</sub>	< 250	250~750	> 750
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	< 250	250~750	> 750
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	< 250	250~750	> 750
CO <sub>2</sub>	< 4000	4000~7000	> 7000
TCG	< 700	700~1800	> 1800
증기량	-	≥ 250/year	≥ 100/month

(주) TCG(가연성 가스 : total combustible gas)  
 = H<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub> + C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> + C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> + C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> + CO

### 2.3 문제점

일반적으로 IEC 기준과 같은 가스 구성비 분석으로 전력용 유입 변압기의 고장 진단을 수행할 수 있지만 현장에 적용하기에는 몇 가지 문제점이 있다. 즉 IEC 기준에 기초하여 3종류의 가스 비율 조합으로 코드를 구했지만 부합되는 고장 진단 유형이 나타나지 않을 수도 있다는 것이다. 또한 동시 다발적인 사고에 대응할 수 없고, 고장의 심각도를 판정하기 곤란한 문제점도 가지고 있다.

또한 주요 가스 분석 기준은 전력용 유입 변압기 각각의 전압, 용량, 절연유 열화 방지 방식, 운전 경력이 서로 다르므로 해당 변압기의 유증 가스 분석 결과에 따라 어떻게 적용·판정하는가는 매우 어려운 문제이다. 그러므로 유증 가스 분석으로 변압기의 고장 진단을 수행하는데 있어서는 이들 몇 가지 방법을 병용하는 것이 효과적이지만 이 방법 역시 유증 가스 분석을 이용한 고장 진단 방법 자체가 매우 복잡해지는 단점을 지니고 있다. 따라서 본 논문에서는 유증 가스 분석에 관련된 대표적인 방법 중에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 가스 구

성비에 의한 분석 방법을 기본으로 채택한 후, 고체 절연물 탄화 유무에 관계된 진단은 주요 가스에 의한 분석 방법을 이용하는 전력용 유입 변압기의 고장 진단 방법을 제안한다.

### 3. 신경회로망을 이용한 고장 진단

1986년 Rumelhart에 의하여 제안된 오차-역전파(error-backpropagation) 알고리즘은 Widrow-Hoff 학습 규칙을 다층 네트워크와 비선형 미분 가능한 전이 함수로 확장한 것이다. 입력 벡터와 출력 벡터를 사용하여 특정한 출력 벡터와 연관되는 입력 벡터의 함수를 근사시키거나, 사용자가 정의한 적절한 입력 벡터로 분류할 수 있을 때까지 네트워크를 학습하게 된다. 본 논문에서는 오차-역전파 알고리즘을 이용한 전력용 유입 변압기 고장 진단 방법을 다음과 같이 제안한다.

우선 가스 구성비 분석에 따른 IEC 기준은 참고 문헌[10]에서 사용한 방법을 적용하여 항상 진단 적용 코드가 산출되도록 하였다. 참고 문헌 [10]에서 사용한 코호넨 네트워크의 알고리즘은 그림 1과 같다. 본 논문에서 참고 문헌 [10]의 알고리즘을 사용한 이유는 학습 예제를 만들기 위함이다.

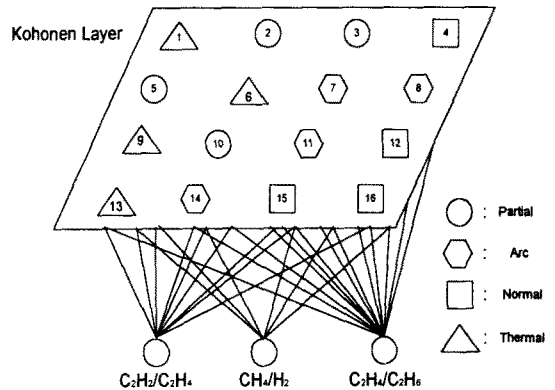


그림 1. IEC 진단 코드 산출을 위한 코호넨 네트워크

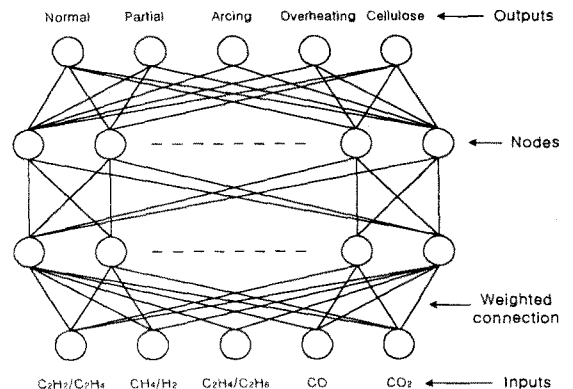


그림 2. 고장 진단을 위한 오차-역전파 알고리즘의 구조(입·출력 관계)

본 논문에서는 고장 진단을 위한 오차-역전과 알고리즘의 학습과 편리한 성능 비교를 위하여 ten-fold cross-validation[9]을 사용하였고, 기본적인 입·출력 구조는 그림 2와 같다. 가스 구성비 및 주요 가스 분석에 관계된 입력과 고장 진단에 관계된 출력은 다음과 같다.

입력 : [C2H2/C2H4, CH4/H2, C2H4/C2H6, CO, CO2]  
출력 : [normal, partial, arcing, overheating, cellulose]

고장 진단을 위한 오차-역전과 알고리즘의 구조(입·출력)는 표 3과 같은 다양한 구조 변화에 따른 성능 비교에 따라 최적 값을 사용하였다.

표 3. 신경회로망의 구조 변화에 따른 성능 비교

신경회로망의 구조	학습 횟수	학습 오차	ten-fold cross-validation
5-20-10-10-5	5000	0.008889	95.56[%]
5-30-15-5	1305	0.009992	97.41[%]
5-50-5	4158	0.009997	93.70[%]

#### 4. 사례 연구

본 논문에서 사용한 사례 연구 데이터는 표 4와 같고, 그 결과는 표 5와 같다. 특히 사례 연구 #4와 같이 과열(overheating) 사고로 인한 절연물 탄화 유무까지 검출할 수 있다.

표 4. 사례 연구 데이터

	사례 #1	사례 #2	사례 #3	사례 #4
H <sub>2</sub>	1398	26	135	165
CH <sub>4</sub>	53	558	33	93
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	14	ND	76	0
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	11	960	45	47
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	12	365	49	34
CO	87	138	30	548
CO <sub>2</sub>	709	940	942	8263

(주) ND : Not detected

표 5. 사례 연구 결과

	사례 #1	사례 #2	사례 #3	사례 #4
증상	partial	overheating	arcing	overheating <sup>P</sup>
normal	0.0000	0.0015	0.0007	0.0002
partial	0.9999	0.0007	0.0078	0.0005
arcing	0.0064	0.0071	0.9949	0.0028
overheating	0.0005	0.9992	0.0040	0.9978
cellulose	0.0033	0.0062	0.0003	0.9921
신경회로망	partial	overheating	arcing	overheating <sup>P</sup>

(주) P : Paper and other cellulose materials involved

#### 5. 결론

본 논문에서는 신경회로망의 적용으로 변압기 유중

가스 분석 자료와 고장에 관련된 특징을 학습시킨 전력용 유입 변압기의 새로운 고장 진단 방법을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 신경회로망을 이용한 고장 진단 방법(유중 가스 분석)은 입력으로 가스 구성비 분석(IEC 기준) 및 주요 가스 분석(한전 기준) 자료를 채택하였다. 또한, 출력으로 전력용 유입 변압기의 고장 및 절연물 탄화 유무의 특징을 신경회로망으로 추출하였다. 따라서 유중 가스 분석만으로 현실성 있는 변압기 진단 및 상태 추정이 가능하게 되었고, 이것의 적용으로 적절한 유지 및 보수 대책 방안을 제시할 수 있게 되었다.

#### [참고 문헌]

- [1] P. S. Pugh and H. H. Wagner, "Detection of Incipient Faults in Transformer by Gas Analysis," *AIEE Transactions*, Vol. 80, No. 1, pp. 189-195, June 1961.
- [2] R. R. Rogers, "IEEE And IEC Codes to Interpret Incipient Faults in Transformers Using Gas in Oil Analysis," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 13, No. 5, pp. 349-354, October 1978.
- [3] IEC Publication 599-1978, Interpretation of The Analysis of Gases in Transformers and Other Oil-Filled Electrical Equipment in Service
- [4] J. J. Kelly, "Transformer Fault Diagnosis by Dissolved-Gas Analysis," *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 16, No. 6, pp. 777-782, November 1980.
- [5] 남창현 외, 변압기 유중 가스 상시 감시 시스템의 운용 연구(연구 보고서), 전력연구원, 1994.
- [6] C. E. Lin, J. M. Ling, and C. L. Huang, "An Expert System for Transformer Fault Diagnosis Using Dissolved Gas Analysis," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 1, pp. 231-238, January 1993.
- [7] K. Tomsovic, M. Tapper, and T. Ingvarsson, "A Fuzzy information Approach to Integrating Different Transformer Diagnostic Methods," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 3, pp. 1638-1646, July 1993.
- [8] Jae-Chul Kim et. al., "Expert System for Fault Diagnosis of Transformer," *Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, Vol. 7, No. 1, pp. 45-53, March 1997.
- [9] Y. Zhang, X. Ding, Y. Lin, and P. J. Griffin, "An Artificial Neural Network Approach to Transformer Fault Diagnosis," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 4, pp. 1836-1841, October 1996.
- [10] 윤용한 외, "유중 가스 분석을 이용한 전력용 변압기 고장 진단용 코호넨 네트워크," 대한전기학회 논문지, June 1998(게재 예정).