

### 전력기기 이상 진단을 위한 가스 센싱 기술 검토

이재덕, 류희석, 최상봉, 남기영, 정성환, 김대경, 최돈수  
한국전기연구원 지중시스템연구그룹

### Gas Sensing Technologies for Power System Diagnosis

Lee JaeDuck, Ryoo HeeSuk, Choi SangBong, Nam KeeYoung, Jeong SeongHwan, Kim Daekyeong, Choi DonSoo  
Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - To reduce the effect of fault on power systems, like GIS and transformers, power system authorities are using various technologies to monitor and diagnose there facilities. Developing On-Line monitoring systems by using IT technology is main issue of nowadays for power system authorities. Among various monitoring and diagnosis technologies, gas sensing technologies can be most useful candidate because large power systems are using gas and oils for there insulation and analyzing density of gases that are included in the gas and oils for insulation purpose tell us what kind of reaction were arisen. In this paper, we describe on the gas sensing technology that are used for power systems monitoring and diagnosis.

상태 기반 진단 기술들이 개발되고 있다. 유입식 변압기는 전력 공급 시스템에서 사용하고 있는 대표적인 변압기이다. 냉각과 절연을 위하여 절연유를 사용하고 있기 때문에 부피가 크고 또 사고시 화재의 발생가능성과 폭발의 위험성도 내포하고 있지만 아직까지 이를 대체할 수 있는 새로운 대용량 변압기의 개발 기술은 미비하여 현재 전력공급용 변압기의 대부분을 차지하고 있다.

유입식 변압기의 감시 및 상태 진단 방법으로 현재 사용되고 있는 방법들은 주로 Off-Line 진단 방식이 사용되고 있다. 사용 방법은 유증가스 분석법과 절연지의 색 측정법, 절연 저항 측정법 등이 사용되고 있다. 유증가스 분석법은 절연유를 채취하여 GC(Gas Chromatography) 방식으로 분석하여 기기의 상태를 분석하는 방법으로써 한국전력에서 주로 사용하고 있으며 절연저항 측정법은 주로 대규모 수용가에서 사용하고 있는 방법이다.

그러나 현재 사용하고 있는 유입식 변압기의 이러한 측정 및 상태진단법들은 저마다의 단점과 한계를 가지고 있으며 이를 극복하기 위해서는 유입식 변압기의 절연유 속에 녹아있는 유증가스 성분을 분석함으로써 정밀한 기기의 상태 진단이 가능해지게 된다. 이러한 추세는 선진국들의 기술 개발 동향에서도 그대로 나타나고 있으며 본 논문에서는 변압기의 유증가스를 분석하여 상태를 진단하는 가스 센싱 기술을 바탕으로 하여 전력기기의 이상 상태를 진단하는 가스 센싱 기술의 응용에 대하여 언급하고자 한다.

### 1. 서 론

경제발전과 생활수준의 향상에 따라서 전력 수요는 계속 증가하고 있으며 설비의 설치를 위한 공간의 축소가 요구되고 있다. 더불어 경제적인 유지 보수가 가능하도록 하기위한 방법의 개발이 요구되고 있다. 이에 따라서 전력설비의 개발 추세는 기기의 소형화와 경량화, 밀폐화가 진행되고 있다. 몰드형 변압기가 개발되어 민수용을 중심으로 빠른 속도로 확산되고 있는 것은 이를 나타내는 좋은 예이다.

그러나 전력설비, 특히 GIS와 고압 변전소에서 사용되는 변압기와 같은 대용량 전력기들은 사고시 파급효과가 크기 때문에 경제성과 함께 안정성이 무엇보다도 중요하다. 따라서 지금까지 개발된 기술들 중에서 가장 안정성이 입증된 기기 및 방식들을 주로 사용하고 있는데 절연을 위해 SF<sub>6</sub> 가스를 사용하는 GIS와 절연유를 사용하는 유입식 변압기가 대표적인 예이다. SF<sub>6</sub> 가스가 환경 규제물질로 지정되어 대체 물질 개발이 본격적으로 진행되고 있으며, 절연 특성이 좋은 재질의 개발에 의해 몰드형 변압기가 개발되고 있지만 경제성과 냉각 등 다른 기술적인 원인으로 인하여 대부분의 대용량 전력 시스템은 절연을 위해 불활성 가스인 SF<sub>6</sub> 가스와 절연유를 사용하고 있다.

대용량 전력 설비들의 안전성 제고를 위해 여러 가지의 방법들이 적용되고 있는데 주로 기기의 상태 감시 및 진단 방법들이 이용되고 있다. 문제는 현재 사용하고 있는 전력설비들을 즉시 경제성과 안전성이 뛰어난 새로운 기기들로 교체하지 못할 경우를 대비하여 설비의 노후화에 따른 상태 진단 기술의 고도화가 필요하다는 점인데 기존에 사용하는 기기 상태 감시 및 진단기술 으로는 한계성이 있어 새로운 기술 개발이 시급하다는 점이다.

GIS의 경우 초음파와 UHF 대역의 주파수를 이용하는 진단기술과 적외선 영상 측정 장비를 이용하는 새로운 진단 기술들이 개발되고 있으며 또 종래의 단속적이고 주기적인 측정에 근거한 상태 진단 방식에서 탈피하여 On-Line 측정과 상태 측정 데이터에 근거하여 진단하는

### 2. 전력설비 이상진단용 가스 센싱 기술

#### 2.1 전력설비 진단용 가스 센싱 기술 개요

대규모 전력 설비는 사고시 그 파급효과가 커 사고를 미연에 방지할 수 있는 효율적인 진단 기술이 개발은 필수적으로 요구된다. 이를 위하여 다양한 진단 기술의 개발되어 적용되어 왔으나 효율적인 진단기술의 개발은 아직 미비하며 더욱이 연속적이고 On-Line 측정과 상태 진단에 의한 진단 및 유지 보수 기술 혹은 시스템의 개발은 아직 미미한 수준에 머무르고 있다.

GIS와 변압기, 개폐기들로 대표되는 대규모 전력설비의 상태 진단 방법을 분류하면 크게 기계적인 고장과 전기적인 고장 진단 방법으로 나눌 수 있다.

기계적인 고장 진단을 위한 방법으로는 와전류를 이용하는 방법, 초음파를 이용하는 방법, 진동 센서 및 영상 센서를 이용하는 방법 등이 주로 사용된다.

전력설비의 고장 및 이상 진단에는 주로 전기적인 특성을 진단하는 경우가 대부분인데 여기에는 주로 화학, 물리적인 특성을 이용하는 센싱 방법이 주로 사용된다. 화학,물리적인 센싱 방식을 주로 사용하는 이유는 앞서 언급한 바와 같이 절연을 위해 불활성 가스나 절연유를 주로 사용하고 있으며 또 전기적으로 이상이 있을 경우 기기들이 과열된다든 특성을 이용하기 때문이다. 즉 과열이나 가스, 절연유 등을 분석하기에는 물리 및 화학 반응을 이용하면 보다 정확하게 원인을 분석할 수 있기

때문이다. 전력 설비들 중에는 변압기 외에도 절연유를 사용하는 경우가 많은데 고압용 전선으로 사용되고 있는 OF cable도 그 중의 하나이다.

다음 표 1은 전력 시스템의 고장 및 이상 진단을 위해 사용할 수 있는 화학, 물리적 특성을 이용하는 센싱 기술을 요약한 것이다.

표 1. 대표적 가스 센싱 기술 요약

센싱기술	동작원리	감도	장단점
금속산화물	전도도 변화	수ppm	저가격/저안정성
QCM	주파수 변화	0.1ng	적용성/농도변환필요
광학센서	스펙트럼변화	ppb	고정도/소형화불리
GC	질량변화	ppb	고정도/고가격

위 표에서 나타난 센싱 기술들을 화학적인 성질을 이용하는 것과 물리적인 성질을 이용하는 것으로 구분하는 것은 명확하지 않지만 금속 산화물 센서를 제외한 QCM, 광학센서, GC를 이용한 센싱 기술은 물리적인 성질을 이용하는 것으로 구분할 수 있다. 금속산화물 센서는 반도체의 특성을 이용한다는 측면에서는 물리적인 성질의 것으로 구분될 수도 있지만 반도체에 흐르는 전류(전자)의 양이 화학적인 반응의 결과로서 나타나기 때문에 두 가지 성격을 모두 이용한다고 할 수 있다.

센싱 기술들의 동작원리를 살펴보면 주로 전도도나 주파수 등의 변화를 측정하는 원리를 사용하고 있는데 대부분 미세한 변화에도 반응을 하고 또 아주 짧은 시간에 측정이 가능한 메카니즘과 기술들을 적용하고 있기 때문에 On-Line 측정 시스템의 구성에도 적합하다. 위 가스 센싱 기술들 중에서 On-Line 측정시스템의 구현에 가장 적합하지 않은 방법은 GC 센싱 기술인데 이는 GC의 경우 측정하고자 하는 대상을 기체화 하는 장치가 필요하고 또 기체화에 시간이 소요되기 때문이다. 하지만 대부분의 응용에서는 피 측정 대상물의 농도가 빠른 시간으로 변화하는 경우가 없어 적용에는 문제가 없다.

감도는 측정 및 진단 시스템의 구현에 있어서 가장 중요한 요소로서 작용한다. 가스 센싱 기술이 전력설비 분야 감시 및 진단 기술로서 여러 분야에 두루 적용될 수 있는 이유 중의 하나가 바로 감도도 좋다는 것에 기인한다. 금속산화물 센서가 전력 설비 분야의 기기 상태 진단 목적으로 사용될 수 있는 이유는 측정하고자 하는 대상물의 농도가 아주 낮아도 이를 측정할 수 있도록 구현할 수 있는 기술이 개발되었기 때문이다.

이 논문에서 비교하고 있는 센싱 기술들 중에서 감도가 가장 좋은 기술은 GC 센싱 기술과 광학 센싱 기술이며 두 기술 모두 ppb단위의 농도까지 측정이 가능하다.

## 2.2 진단용 가스 센싱 기술 특성과 적용 분야

센싱 기술들의 장단점은 적용 분야 및 목적과 크게 관련되어 있다. 전력 설비들이 여러 가지 기술들의 개발에 힘입어 소형화, 경량화, 밀폐화가 되고 있는 경향이 있는데 그 이유는 경제성 추구와 안전성의 확보가 가능해졌기 때문이다. 전력설비들의 이러한 개발 경향에 따라서 기기 진단 방법들 또한 고도화 될 수밖에 없는데 센싱 방법의 선정을 위해서 고려해야 하는 요소들로는 정확성, 구현의 용이성, 소형화 가능성, 비파괴 진단 가능성, 내구성, 즉시성, 경제성 등을 들 수 있다. 다음 표 2는 가스 센싱 기술 분야별 특성을 정리한 것이다.

표 2. 대표적 가스 센싱 기술 특성 요약

센싱기술	정확성	구현성	소형화	즉시성	내구성	경제성
금속산화물	○	△	○	○	△	○
QCM	○	○	○	○	△	○
광학센서	○	○	○	○	○	○
GC	○	X	X	○	△	X

비파괴 진단 가능성은 크기와 적용 목적에 따라서 다르게 되는데 기본적으로는 여기에서 언급하고 있는 센싱 기술들이 비파괴 진단과 정밀 진단을 목적으로 개발된 기술들이기 때문에 적용이 모두 가능하다. 다만 GC의 경우에는 크기가 크고 기체화를 하기 위한 별도의 장치가 추가되는 단점이 있다.

정확성은 감도와 직접적인 관계가 있는데 GC와 광학 센싱 기술이 ppb 단위까지의 농도 측정이 가능하여 가장 좋으며 QCM의 경우 질량과 농도 변환을 위한 별도의 처리과정이 필요하게 된다.

전력 기기들의 상태 진단을 위한 가스 센싱 시스템을 구현할 경우의 용이성 측면에서는 QCM 방식이 가장 유리하다. QCM은 회로 구성이 비교적 간단하며 크기 또한 소형으로 구현할 수 있어서 손쉽게 설치될 수 있는 장점이 있다. 광학 센싱 기술은 진동에 대한 대책과 기기를 설치하는 공간 확보 측면에서 다소 제약을 받을 수 있으며 금속 산화물 센싱 기술의 경우 정확도를 높이기 위해 필요한 별도의 신호처리 과정이 복잡해지는 단점을 가지고 있다. GC의 경우는 기기가 크고 별도의 장치가 필요하여 구현성 측면에서는 가장 불리한 방식이 된다.

소형화 측면에서는 QCM과 금속 산화물 방식이 소형 반도체를 이용하기 때문에 가장 유리하며 GC 방식이 가장 불리한 방식이다.

On-Line 측정 및 진단 시스템의 구성과 관련된 신호 응답의 즉시성 측면에서는 GC를 제외한 다른 모든 방식 모두 아주 좋은 특성을 가지며 아주 고속의 신호 변화에도 적용이 가능하다. 다만 GC 방식의 경우에는 앞서 언급한 바와 같이 피 측정 대상을 기체화하기 위한 처리 과정과 이에 따른 시간 지연이 있어 고속의 신호 변화가 있는 경우에는 적용이 불가능하다.

내구성은 유지보수의 편리성과 경제성 모두와 관련이 깊다. 광학 센싱 기술의 경우 신호원과 검출기, 기기 구성 부품 등 모두가 사용시간 및 고장을 등의 측면에서 아주 유리한 방식이다. 그 외 나머지 방식들은 모두 현재 까지 개발된 기술상으로는 장시간 사용이 불가능하며 정밀 진단을 위한 추가적인 처리과정이 필요하여 유지보수 비용이 추가 적으로 필요하게 된다.

경제성 측면에서는 금속산화물 방식이 단연 유리하다. 저렴한 반도체 센서를 사용하며 별도의 부가적인 장치가 필요 없기 때문이다. QCM의 경우도 금속산화물 센싱 방식과 비슷하나 질량을 측정하여 기체 농도로 변환하는 부가적인 처리가 필요하고 흡착막의 제작에 부가적인 경비가 들어가는 점이 금속산화물 센싱 방식에 비하여 경제성 측면에서 단점으로 남는다.

가스 센싱 기술의 전력 설비 감시 및 진단 제어 분야로의 적용이 최근 증가하고 있다. 이는 감도가 높은 측정 기술과 신호처리 및 진단 기술 등이 개발되면서 종래에 불가능했던 감시 및 진단이 가능해졌기 때문이다. 더불어 최근의 IT기술의 발달에 힘입어 광대역 On-Line 및 원격 측정 기술이 개발되면서 그 증가 추세는 더욱 가속될 것으로 보인다.

전력설비 감시 및 진단 분야에 적용되고 있는 가스 센싱 기술 분야는 지금까지는 선진국을 중심으로 도입되고 있는 추세이며 일부 기술 및 제품들은 국내에서도 도입 및 개발되고 있다. 기존 적용분야 및 적용이 가능한 분야를 살펴보면 다음과 같다.

GC 센싱 기술은 유입식 변압기의 유증가스 분석에 사용되고 있다. 유증가스에는 변압기의 과열 및 부분 방전 현상, arching 현상 등에 의하여 발생하는 탄화수소계 가스 성분이 존재하고 이를 분석하면 변압기의 상태 진단을 할 수 있는데 GC 센싱 기술이 주로 이용되고 있다. 그러나 GC 센싱 기술은 부피가 크고 즉시성이 떨어지며 가격이 비싼 단점이 있어 주로 Off-Line 분석용으로 주로 사용되고 있다. 최근에 특정 가스만을 분석하되 부피와 가격을 줄이고 On-line 원격 측정이 가능한 제품

들이 조금씩 선을 보이고 있는 중이다.

광학 센서는 적외선 영상을 이용하는 경우와 단위 센서들을 이용하는 경우로 크게 구분할 수 있는데 적외선 영상 센서는 단위 적외선 센서들의 어레이를 이용하여 진단에 적용하고 있다. 적외선 영상 센서는 주로 가스가 누출되는 현상을 점검하기 위하여 전력기기의 외부에 설치되어 사용하는데 SF<sub>6</sub> 가스를 검출하기 위해서 일부 전력회사에서 사용하고 있다. 단위 광학센서를 이용하는 센싱 기술은 가스가 존재하는 전력 설비의 내부에 취부되어 사용되는 경향이 있으며 검출 대상 가스가 특정 파장을 흡수하는 원리를 이용한다. 전력 설비 분야에서는 역시 SF<sub>6</sub> 가스를 검출하기 위해서 적용되고 있다.

QCM 센싱 기술은 여러 가지 가스가 혼합되어 있는 경우에는 적용하기가 힘들다. 단일의 가스가 존재하는 경우에는 미세한 가스 입자가 진동막에 흡착되어 변화되는 질량에 의해 진동 주파수가 달라지는 점을 이용하여 가스의 농도를 측정하는 방식이다. 절연에 사용되는 불활성 가스의 농도 변화를 정밀하게 측정하는데 사용될 수 있으며 비교적 경제적으로 또 간단하게 구현이 가능하나 유지 보수가 용이하지 않은 문제점을 가지고 있다.

금속산화물 센서를 이용하는 센싱 기술은 여러 가지 장점을 가지고 있다. 우선 소형으로 또 경제적으로 구현이 가능하며 무엇보다도 여러 가지 가스가 혼합되어 있는 경우에도 적용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 물론 GC 센싱 기술도 복합 가스의 검지 및 농도 측정이 가능하지만 고가격, 큰 부피, 반응의 즉시성 부족 등 GC 센싱 기술의 단점을 거의 해결할 수 있다는 점은 큰 장점으로 작용한다. 내구성이 떨어지는 점이 단점으로 작용하고 있지만 종래 문제가 되었던 정확도가 신호처리 기술 및 필터 어레이 센서 구성 방식에 의해 해결됨으로써 다양한 분야에서 적용될 수 있을 것으로 예측된다.

### 2.3 유입식 변압기 진단용 가스센싱기술 적용 검토

대규모 전력 공급설비들은 안정성이 무엇보다도 중요하다. 따라서 지금까지 개발된 기술들 중에서 가장 안전성이 입증된 기기 및 방식들을 주로 사용하고 있는데 절연과 냉각 목적으로 절연유를 사용하는 유입식 변압기가 대표적인 예이다.

유입식 변압기가 과열, 부분방전, arcing 현상 등의 원인으로 열화되면 절연 목적으로 사용되는 절연유는 그 성분의 변화를 일으키고 따라서 절연유에 녹아있는 가스의 성분을 분석하면 그 열화 정도를 분석할 수 있다. 이 분야에서 오랜 기간 동안 연구되어온 결과들이 쌓여서 유중 가스의 성분을 통해 그 열화 정도와 변압기의 상태를 진단하는 방법에 대해서는 이미 표준화가 이루어져 여러 전력회사들이 이를 바탕으로 변압기를 유지 보수하고 있다. IEC 60599, IEEE c57.104 등의 규격은 유중 가스의 분석에 관하여 규정하고 있다.

유중가스의 분석은 일반적으로 수소, 에틸렌, 아세틸렌 등 7가지의 탄화 수소계 가스를 분석하는데 한국전력에 서도 이들 유중가스를 분석하여 변압기의 상태를 판정하는 상태판정 기준을 정해두고 있다.

표 3은 현재의 유중가스 농도에 따른 유입식 변압기 상태 판정 기준 중에서 수소와 에틸렌 그리고 아세틸렌과 이산화 탄소 관련 부분을 요약한 것이다.

표 3. 유입식 변압기 상태 판정 기준

	정상	요주의	이상	위험
수소	400미만	400이상	800초과	1200초과
아세틸렌	20미만	20이상	60초과	120초과
에틸렌	300미만	300이상	750초과	1000초과
TCG	1000미만	1000이상	2500초과	4000초과

표 3에 나타낸 수치들의 단위는 ppm이다. 표에 나타낸 가스들은 유중가스 분석시 주로 핵심적으로 모니터링 되는 가스들인데 정밀 판정을 위해서는 이들 가스의 변화량을 모두 추적하여 판단하는 것이 유리하지만 현재 시장에서 판매되고 있는 제품들은 주로 비싼 GC 센싱 방법을 사용하기 때문에 단일 가스 혹은 표에 나타낸 가스들을 중점적으로 추적하여 상태 진단을 하고 있다.

표 3의 가스들은 7가지 측정 대상 가스들 중에도 보다 중요한 의미들을 가지는데 수소가스는 부분방전과 과열, 아세틸렌 가스는 부분방전, 에틸렌 가스는 열화 현상과 깊은 관계가 있기 때문이다. 또 단일가스 뿐만 아니라 총 탄화수소계 가스 총량(TCG)으로도 상태 진단을 할 수 있다.

표 3에 나타낸 가스들 중 측정이 가장 어려운 가스는 부분 방전과 깊은 관계가 있는 아세틸렌 가스인데 주로 수십 ppm 단위의 정밀 측정 기술을 요하고 있다. 지금 까지 가장 경제성이 좋고, 소형화가 용이한 금속산화물 가스센싱 방식이 적용되지 않고 비싸고 Off-Line 측정 방식인 GC 센싱 기술이 적용될 수 밖에 없었던 원인이 금속산화물 센싱 기술로서는 의 수십 ppm의 농도 측정이 불가능하였기 때문이다.

하지만 최근 어레이 센서를 이용하고 보다 정밀한 신호처리 기술을 적용하여 수 ppm 단위의 가스 농도 검출이 가능해 지고 있다. 곧 저렴한 가격의 가스 센싱 기술이 개발되어 유중 가스의 분석에 적용될 수 있다는 것이며 이 기술은 다른 전력 설비들의 상태 진단에도 유용하게 적용될 수 있을 것으로 보인다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 가스 센싱 기술의 전력 설비 감시 및 진단 기술 개발 분야 응용에 관하여 살펴보았다. 최근 주로 적용되거나 개발 중인 센싱 기술들을 분석하여 전력설비의 감시 및 진단에 적용할 수 있는 기술들을 고르고 그 기술들의 특징과 장단점을 살펴보았으며 그 기술 개발 동향도 살펴보았다.

그 결과로서 가스 센싱 기술의 전력 설비 감시 및 진단 제어 분야로의 적용이 최근 증가하고 있다는 것을 알 수 있었으며 또 감도가 높은 측정 기술과 신호처리 및 진단 기술 등이 개발되면서 그 응용 분야도 크게 증가할 것으로 예측된다. 특히 저렴한 금속산화물 가스 센싱 기술의 경우 수 ppm 단위의 가스 농도 검출이 가능해 지고 있어 유입식 변압기의 유중 가스의 분석에도 적용될 수 있을 것으로 보이며 곧 저렴한 가격으로도 여러 가지 설비의 상태 진단에도 유용하게 적용도될 수 있을 것으로 보인다.

### [참 고 문 헌]

- [1] A.M. Ferber 외, "A mixture silicon photoacoustic detector for gas monitoring application", mtec 2001 International Conference on Sensors & Transducers, Feb. 14, 2001
- [2] Xavier Maldague, "Application of infrared thermography in nondestructive evaluation"