

변전기기 예방진단시스템(상)

권 동 진

한국전력공사 전력연구원 선임연구원/공학박사

1. 머리말

변전기기는 사고시 정전범위가 광역화되므로, 신뢰성을 확보하여 안정적으로 전력을 공급하기 위해 최근 예방진단시스템이 적용되고 있다. 예방진단시스템은 변전기기의 운전상태에서 이상징후를 상시로 감시하여 불시정전을 방지하며, 축적된 데이터로 최적의 유지보수 계획을 수립하는 변전소 자동화 운전에 대응하기 위한 시스템으로, 온라인 이상검출 기술을 종합하여 시스템화하는 것이다.

계통전압이 증가함에 따라 변전기기 사고가 사회에 미치는 영향이 막대해지므로, 세계 각국에서는 예방진단기술을 향후 변전기기 운영의 필수요소로 인식하여 각국마다의 특성에 맞도록 예방진단시스템을 개발하여 적용하고 있다. 국내에서는 1980년대 중반부터 전력연구원을 중심으로, 변압기를 대상으로 초음파 기술을 이용한 온라인 부분방전 측정, 유증가스 상시 감시장치 등 온라인 이상검출 기술을 개발하여 왔으며, 1998년부터 한전의 8개 345kV 변전소에 적용 중에 있으며, 2004년부터 운전예정인 765kV 변전소에도 적용할 예정이다.

변전기기 예방진단시스템은 변전기기 구성품의 열화진

전 메커니즘 규명과, 각종 이상징후를 검출할 수 있는 센싱기술의 개발, 컴퓨터에 의한 온라인 감시기술의 개발 및 전문가시스템을 이용한 진단 알고리즘 기술의 개발 등이 이루어져야 한다. 특히 예방진단 알고리즘은 변전기기의 특성에 따라 각각 적용되므로, 국내에 예방진단시스템을 적용키 위해서는 국내 변전기기에 적합한 진단기준 설정 및 변전소 운영입장에서의 진단 알고리즘 개발에 대한 독자적인 연구가 필요하며, 이는 장기간의 이상검출 기술의 적용경험과 예방진단시스템의 운전경험을 거쳐야 효과적인 알고리즘 도출이 가능할 것이다.

본 원고에서는 변전기기 예방진단시스템의 개발현황을 분석하고, 변전기기의 이상을 사전에 검출하기 위한 온라인 이상검출기술과 데이터 취득장치 및 모니터링 프로그램에 대하여 기술하였다.

2. 예방진단시스템 개발 현황

예방진단시스템은 크게 Operational Parameters를 측정하는 센서, 센서로부터 신호를 취득하는 Data Acquisition System, 수집된 데이터로부터 비정상 상태, 원인을 판정하는 Diagnostic System으로 구분된다.

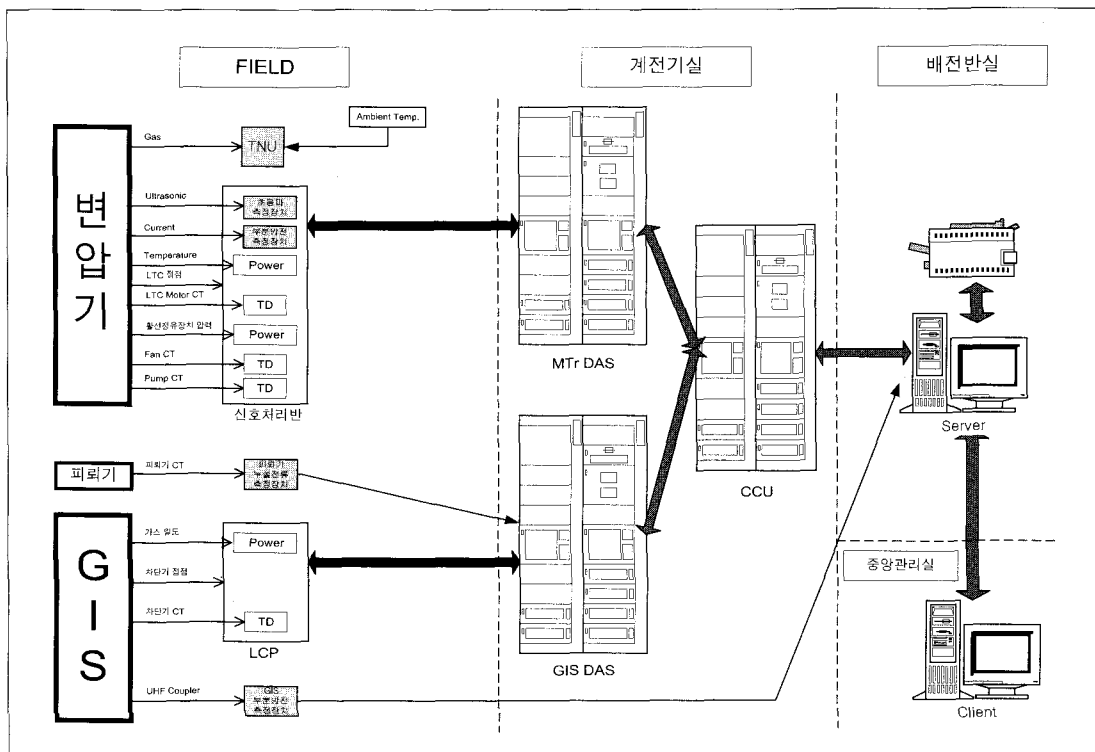
예방진단시스템에 적용되는 대부분의 센서는 센서 전문업체에 의해 상용화되어 있다. Data Acquisition System은 최근의 정보처리 기술의 발달에 따라 활발히 발달하고 있는 분야이며, 데이터 처리장치 전문업체에 의해 제작 가능하다. Diagnostic System은 예방진단시스템에서 가장 어려운 부분으로, 다양한 적용연구를 거쳐야 효과적인 진단 알고리즘을 도출할 수 있을 것이다.

가. 국내의 예방진단시스템 개발 현황

국내에서는 1980년대 중반부터 전력연구원, (주)태광이엔시, 한국전기연구원, 숭실대학교를 중심으로 각종 이상검출 기술을 개발하여 왔다. 국내에서의 예방진단 연구는 “전력기기 예방진단 기술 연구(1984~1985)”에

서 일본, 미국, 유럽지역의 중전기 회사의 예방진단 기술을 국내 최초로 조사, 분석하였다. 당시는 국제적으로 예방진단이 개념정립 단계에 있었고, 일부 이상검출 기술이 시적용 중에 있었으나, 신뢰성은 입증되지 않은 상태였다.

“전력설비의 사고예방 및 진단시스템 개발(1991~1993)”에서는 초음파 기술을 이용한 변압기 부분방전 측정장치를 개발하고, 시험용 변압기에 적용하여 적용 가능성을 입증하였다. “변압기 유증가스 상시 감시시스템의 운용 연구(1992~1995)”에서는 절연유의 수소 및 가연성가스 총량 자동검출장치를 개발하여, 변전소에서 시범 적용하였다. “변전설비 보수지원 시스템 개발연구(1994~1996)”에서는 변전설비 유지보수를 위한 지원시스템



〈그림 1〉 765kV 변전기기 예방진단시스템의 구성도

을 개발하여 한전의 변전소에 적용중이다.

“765kV 피뢰기 진단시스템 개발(1999~2001)”에서는 피뢰기 누설전류 진단시스템을 개발하여 변전소에 시범적용중이다. “765kV 변전기기 예방진단시스템 개발(1998~2001)”에서는 그림 1과 같이 765kV 변전소에 적용하기 위한 예방진단시스템에 대해 전력연구원과 (주)태광이엔시가 공동으로 체계적인 연구를 수행하였다. 온라인 이상검출 센서의 적용기법을 개발하고, 각종 이상검출기술을 집약한 예방진단시스템을 국내 최초로 개발하여 345kV 의령변전소에 시범 적용중이다. 특히 초음파를 이용한 부분방전 측정장치를 순수 국내 기술로 개발 완료하였으며, 진단항목별 및 진단항목간의 알고리즘을 개발하였다. 그러나 국내에서의 연구는 국외에 비하여 연구의 양이 절대적으로 부족한 실정이며, 향후 예방진단시스템의 정착과 활용에 많은 관심이 필요한 시점이다.

나. 일본의 예방진단시스템 개발 현황

일본에서는 1970년대부터 각종 이상검출 기법을 활발히 연구하여 왔으며, 1980년대 중반에 Hitachi, Toshiba, Mitsubishi 등 중전기 제작사별로 각각 예방진단시스템을 개발하여, 변전기기 납품시에 같이 공급하고 있다. 일본에서는 온라인과 오프라인의 적용목적에 따라 등급을 구분하여 개발하고 있다. 오프라인 진단장치는 휴대용 계측기로, 각종 센서를 임시로 설치하여 데이터를 측정하고, 측정된 데이터를 측정기의 프로그램에 의해 기억, 관리하는 시스템이다. 이러한 데이터 관리 시스템에는 종래의 데이터 수집, 정리작업이 자동화되고, 설정된 레벨과의 비교와 경시변화 등이 용이하게 얻어지므로, 효율적인 보수계획 수립이 가능하다.

열화속도가 급격한 설비를 관리하기 위해서는, 단시간에 다수기기의 이상을 간단히 진단하고, 열화경향의 관리

〈표 1〉 500kV 변전소의 예방진단시스템 적용 예

진 단 항 목		九電 新熊本 S/S	東電 新今市 S/S	東電 東山梨 S/S	四電 川内 S/S	東電 新坂戸 S/S	中國 新西廣島 S/S	東北 西仙 S/S	東電 新今市S WS	關電 山崎 試驗場	北陸 可賀 S/S
변압기	부분방전			○	○					○	
	유중가스			○	○		○	○			○
	OLTC 모터전류			○	○	○	○	○			○
	유온	○		○	○	○	○	○		○	○
	유면				○	○	○	○		○	○
GIS	부분방전		○	○	○		○	○		○	
	접속부 과열측정				○					○	
	CB 개폐시간		○	○	○		○	○	○		○
	차단기 제어전류		○	○			○	○	○		○
	ES/DS		○	○	○			○	○		
	피뢰기 누설전류	○	○	○	○		○			○	○
	피뢰기 동작전류		○	○		○		○	○		
	가스압력	○		○	○	○	○	○			○
	고장점 표정			○	○	○	○	○		○	○
유압펌프		○	○	○		○	○	○		○	

와 정밀진단의 대상을 선정할 수 있는 온라인 모니터링이 유효하다. 온라인 예방진단시스템에서는 센서에서의 측정 데이터를 메모리에 기억시키고, 측정치가 설정기준을 초과하는 경우에는 설비의 이상을 real-time으로 경보한다. 이러한 온라인 모니터는 열화의 정량적 관리와 축적된 데이터에서 진단경향과 일보, 월보 등의 작성도 용이하다. 표 1은 일본의 500kV 변전소의 예방진단시스템의 적용 예이다.

다. 미국의 예방진단시스템 개발 현황

미국에서는 open terminal type 변전기기가 주종을 이루고 있으므로, GIS에 관련된 연구는 활발하지 않고, 변압기, GCB를 대상으로 기기별 진단장치 개발에 주력하고 있다.

MIT에서는 1980년대부터 변압기 예방진단을 중심으로 가장 체계적인 연구를 진행하여 왔으며, 여러 가지 진단기법을 제시하고 있다. MIT에서는 절연유 온도, 가스

분석, 전압, 팬/펌프상태를 감시하는 시스템을 개발하여 Boston Edison System의 345/115kV 변압기 6대에 적용하여 시험중이며, 연구실에서는 열열화 모델과 가스 열화 모델을 이용한 모델시험으로 추정치와 실제 측정치를 비교, 분석중에 있다. MIT에 의하면, 변압기의 주요 사고모드로 권선 절연파괴를 전체 사고의 50% 정도로 분석하고 있으며, oil insulation breakdown, bushing insulation breakdown, tap-changer mechanical failure 및 cooling system malfunction을 주요 사고모드로 분류하고 있다. 이러한 변압기의 사고를 미연에 방지하기 위하여 MIT에서는 표 2와 같은 예방진단 항목을 감시하고 있다.

3. 온라인 이상 검출 기술

최근 변전기기의 운전상태에서 이상을 검출하기 위한 광범위한 센서기술이 개발되고 있다. 이러한 센서기술은

〈표 2〉 Monitoring Methods for Transformers

	Diagnostic	Predictive	On Line	Failure Modes	Monitoring Technique
Oil Analysis	Y	Y		ABC	Laboratory tests
Moisture in Oil	Y	Y			No sensors exist now
Gas in Oil	Y	Y	Y	AC	Hydran, Gas in oil analyzer
Partial Discharge	Y	Y	Y	BC	Inner wave guide, Acoustic sensors
Vibration	Y	Y	Y	G	Accelerometers*
Temperature	Y		Y	ABCDEF	RTDs, Optic fiber sensors**
Current***	Y		Y	AD	CT
Voltage	Y		Y	A	PT
Fan/Pump Status	Y	Y****	Y	F	Switch position, Motor current

* : Only for winding vibration, still under development
 ** : Only for temperature measurement inside the winding
 *** : Including phase currents and bushing charge current
 **** : If applying motor current analysis

Main failure modes

A : Overload, B : Winding insulation breakdown, C : Oil insulation breakdown D : Bushing insulation breakdown, E : Tap changer mechanical failure F : Cooling system malfunction, G : Winding misalignment

각종 센서를 변전기에 상시로 설치하고, 센서에서 취득된 데이터를 컴퓨터로 처리하는 것을 기본개념으로 하고 있다.

가. 유증 가스

변압기는 절연성과 냉각성을 확보하여야 하므로 보통 절연유와 유침지의 복합절연이 채용되고 있으며, 변압기 권선은 부분방전이 발생하여도 바로 절연파괴에 도달하지 않고, 부분방전이 다수 발생함에 따른 생성가스가 발생한 후 절연파괴로 이어진다. 또한 변압기의 내부이상은 주로 절연파괴와 국부과열에 의한 발열을 동반하므로, 이러한 발열원에 접하는 절연유, 절연지, 프레스보드 등의 절연물은 분해반응하여 탄화수소계 가스가 발생한다. 이 발생가스의 대부분은 절연유 중에 용해되므로, 변압기에서 절연유를 채취하여 유증 가스를 분석하여 내부 이상을 진단한다.

현재의 유증 가스분석은 현지에서 채유된 샘플을 시험실에 운반하여, 가스 크로마토그래피(gas chromatography)로 분석하여, 변압기의 이상유무를 진단하고

〈표 3〉 이상의 종류에 따른 가스성분

이상의 종류	유증 혼합가스(· : 주요발생가스)
절연유의 과열	H ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆ , C ₃ H ₆ , C ₃ H ₈
유침 고체 절연물의 과열	CO, CO ₂ , H ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆ , C ₃ H ₆ , C ₃ H ₈
절연유 중의 방전	H ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₂ , C ₂ H ₄ , C ₃ H ₆
유침 고체 절연물의 방전	CO, CO ₂ , H ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₂ , C ₂ H ₄ , C ₃ H ₆

있다. 일반적으로 분석대상가스는 O₂, N₂, H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂, CO, CO₂ 등 9종류의 가스이다. 변압기 내부의 이상은 종류에 따라 표 3과 같이 가스성분이 발생하므로, 발생가스의 양 및 가스조성비에 의해 변압기의 내부이상의 유무, 그 정도 및 이상의 종류를 추정한다.

현재 가스 크로마토그래프에 의한 유증 가스 분석방법은 여러 성분의 가스를 높은 정밀도를 가지고 검출할 수는 있으나, 구조가 복잡하고, 측정시 숙련가가 필요하며, 가스분석을 위한 시간 및 비용이 많이 드는 단점이 있다. 따라서 유증 가스 분석의 온라인화를 목적으로 특정가스

〈표 4〉 한전의 유증 가스 판정기준 및 분석주기

구 분	정상(ppm)		요주의(ppm)		이상(ppm)		위험(ppm)	
	200kV 이하	345kV 이상	200kV 이하	345kV 이상	200kV 이하	345kV 이상	200kV 이하	345kV 이상
H ₂ *	400 미만		400 이상		800 초과		1,200 초과	
CO*	400 미만	350 미만	400 이상	350 이상	700 초과	600 초과	1,000 초과	800 초과
C ₂ H ₂ *	25 미만	20 미만	25 이상	20 이상	80 초과	60 초과	150 이상	120 이상
CH ₄ *	250 미만		250 이상		750 초과		1,000초과	
C ₂ H ₆ *	250 미만		250 이상		750 초과		1,000초과	
C ₂ H ₄ *	300 미만		300 이상		750 초과		1,000초과	
CO ₂	5,000 미만		5,000 이상		7,000 초과		-	
TCG	1,000 미만		1,000 이상		2,500 초과		4,000초과	
경시증가량	200미만/월		200이상/월		200이상/월		300이상/월	
분석주기	1회/년		추적조사, 1회/3월		추적조사, 1회/1월		내부점검실시	

* : 가연성 가스, TCG : O₂, N₂, CO₂ 가스를 제외한 가연성가스의 총량

만을 집중 분석하거나, 다종류의 가스성분을 검출하여 이상의 유무를 판단하는 방법이 적용되고 있다.

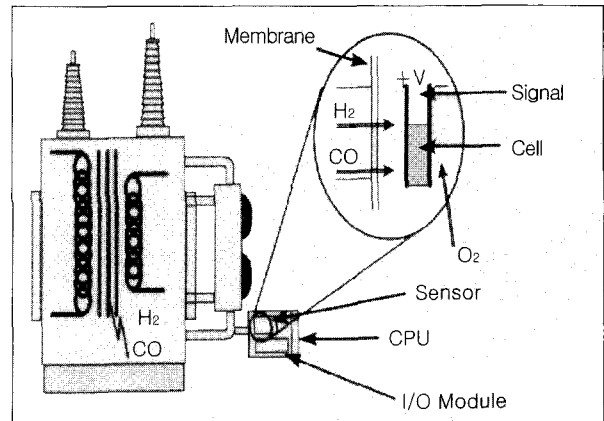
(1) 수소 가스

유중 용해가스 중에서 주 성분인 수소가스만을 집중 분석하는 기법이다. 이 방법은 유중의 용해가스를 가스 선택 투과성을 이용한 고분자 투과막(Membrane)을 이용하여 절연유 속의 수소가스량을 측정한다. 특정가스 중 수소가스가 가장 널리 적용되고 있는 것은 내부이상 및 다른 가스와의 상관관계가 클 뿐만 아니라, 투과막을 사용했을 때 평형상태가 되는 시간이 다른 가스에 비해서 훨씬 짧으므로 추출이 쉽기 때문이다.

일례로 캐나다 GE Syprotec사의 Hydran 센서는 H₂(100%), CO(18%), C₂H₂(8%), C₂H₄(1.5%) 비율로 측정하여 단일신호로 출력한다. Hydran 201i는 센서부, CPU 및 I/O 모듈부가 내장된 Hydran 201Ti, 가스농도를 전기적 신호(0~1mA, 4~20mA, 0~1V, 0~10V) 및 Serial Signal(0~1,999ppm)로 송신할 수 있는 제어부인 Hydran 201Ci로 구성된다. 센서부는 선택적 투과막과 전자가스 탐지자로 구성되어 있다. 절연유에 용해된 수소, 일산화탄소, 에틸렌과 아세틸렌은 투과막을 통하여 주변의 공기에 의해 산소와 반응한다. 이러한 화학반응은 그림 2와 같이 저항에서 전압강하를 일으켜 전류를 발생시킨다. 또한 센서부에 위치한 온도계는 측정시 설정된 온도로 보상을 한다. 센서부는 변압기 본체에 설치하며, 가스분석시 온도 등의 조건을 일정하게 유지시킨다. 측정된 가스농도는 데이터 취득장치로 전송된다.

Hydran 201i의 주요 사양은 다음과 같다.

- 가스 측정범위 : 0~2,000PPM
- 정밀도 : ±10%(H₂)
- 측정감도 : H : 100%±10%,
CO : 18%±3%



〈그림 2〉 Hydran 201i 센싱원리

C₂H₂ : 8%±2%,

C₂H₄ : 1.5%±0.5%

- 응답시간 : 10분 이내(90% step change시)
- 출 력 : DC 4~20mA
- 경보출력 : HI, HI-HI, Fail
- 주위온도 : -35°C ~ + 55°C

(2) 다종류 가스

한전의 가스분석 판정기준에 사용되는 가스의 종류는 H₂, CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, CO, CO₂ 등 7가지 가스이다. 또한 가스 Pattern법에 의한 진단방법과 IEC Code법에 따른 가스성분비 구성에 의한 진단방법, Dornenburg & Roger Ratio Method에 의한 진단방법에서 사용되는 가스의 종류는 공통적으로 H₂, CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆ 등 5가지이다. 그러므로 가스 측정으로 변압기 절연이상을 종합적으로 감시하고, 부분방전 및 부하전류 등과의 상관관계에 의한 진단 알고리즘을 구축하기 위해서는 최소한 위의 5가지 가스를 실시간으로 측정하는 것이 바람직하다.

일례로 GE Syprotec사의 TNU(Transformer

〈표 5〉 가스 검출범위와 검출감도

	H ₂	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	CH ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	수분
Detection Limit(ppm)	10	1	3	1	20	5	10	5%
Repeatability(+/-ppm)	5	0.3	0.6	0.2	5	2	5	3%
Range(ppm)	10~2,000	1~1,000	3~1,500	1~1,500	20~1,500	5~2,000	10~3,000	5~95%

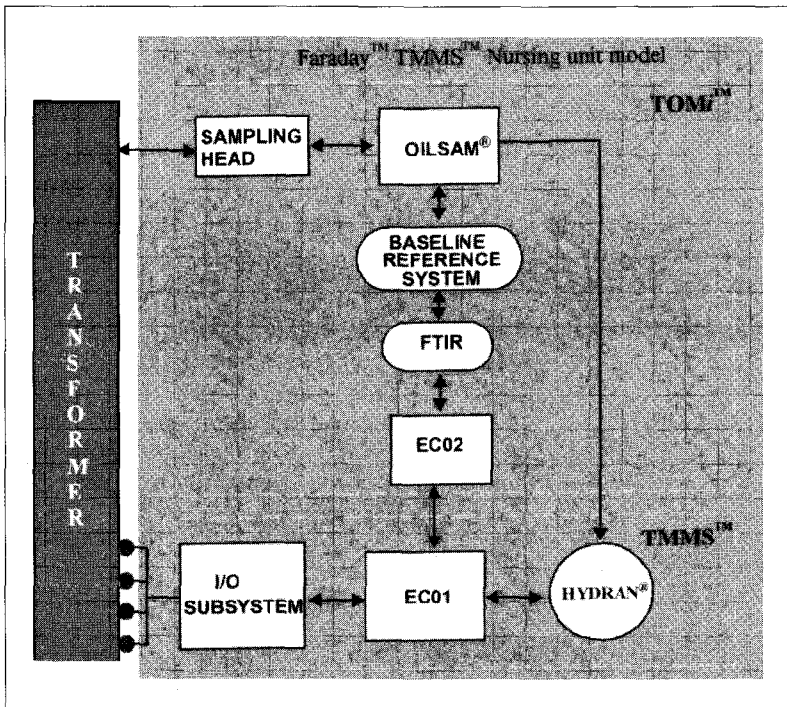
Nursing Unit)는 온라인화의 관점에서 가스 크로마토 그래프 대신에 H₂, CO, CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆ 등 6종류 가스를 상시로 감시하는 방법이다. TNU의 구성 및 검출가스 종류, 검출범위 및 감도는 그림 3, 표 5와 같다.

TNU는 Sampling Head Assembly를 포함한 TMMS(Transformer Monitoring and Management System) 및 TOMi(Intelligent Total Oil Management)

로 이루어졌다. Sampling Head Assembly부는 변압기에 부착되며, 절연유를 분석하기 위하여 오일 분석장치(OILSAM)에 절연유를 공급하고, 분석된 절연유를 변압기에 다시 순환시키는 역할을 한다. TOMi는 변압기로부터 절연유 샘플을 취득하여 각 가스의 농도와 수분을 측정한다. TMMS는 외부와의 통신 및 I/O 인터페이스를 위한 제어부 등으로 구성된다. 가스분석 중 H₂ 가스는 Hydran 201i 센서를 사용하며, 나머지 CO, CO₂, CH₄,

C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆ 가스는 FTIR (Fast Fourier Transform Infrared) 기법을 이용하여 분석한다.

FTIR 측정법은 절연유 내의 용존 가스에 적외선을 주사한 후, 흡수되는 각 가스의 고유 파장을 분석하여 가스의 농도를 검출하는 기법이다. 진단방법은 특정가스의 농도 및 증가경향을 일차적으로 진단하고, 열화의 징후가 판정되면 전 성분을 대상으로 유증가스를 분석하고, 이상판정이 되면 전기적인 시험 등으로 종합 진단한다. 검출 시기는 주기를 설정하거나(예로 매월 1, 11, 21일), 상위계에서의 지령 또는 수동으로 요구할 수 있다. ■



〈그림 3〉 TNU의 구성도

〈다음호에 계속〉