

유입식변압기 감시진단 기술로드맵

선중호, 이상화, 김광화  
한국전기연구원

Technical road map for monitoring and diagnosis of oil immersed transformer

J. H. Sun, S. H. Yi, K. H. Kim  
Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - 본 연구에서는 진단연구회에서 계획중인 유입식변압기의 감시진단기술에 관한 로드맵을 설명하고 있다. 유입식변압기의 용량 및 절연기술의 변천과 최근의 절연유 및 고체절연물, 변압기설계기술 연구동향에 대하여 설명하였다. 또한 변압기의 열화기구 및 현재의 감시진단 기술분석을 통한 기술로드맵을 작성하였다. 기술로드맵에서는 유입식변압기의 고장을 신뢰성 있고 효율적으로 수행할 수 있는 센싱기술, 신호처리기술, 데이터분석기술, 장치개발기술 등을 기술하였다.

비전문위원회의 진단연구회에서 앞으로 목표로 하고 있는 유입식변압기의 기술로드맵에 관하여 설명하고 있다. 유입식변압기의 열화원인 및 진행에 설명하고 있고 고장원인에 대한 고장율에 관하여 조사하였다. 고장율을 기준으로 진단항목을 결정하였고 결정된 진단항목에 대한 기술로드맵을 작성하였다.

2. 본 론

1. 서 론

전력기기의 감시 및 진단은 기기성능의 유지 또는 수명 연장을 위하여 불량개소를 조기에 발견하여 고장을 미연에 방지하는 것을 목적으로 하고 있다. 최근 도심지역의 확장과 산업의 발전으로 전력수요가 급격히 증가하고 있으며, 정보산업의 급부상과 컴퓨터에 의한 산업시설 제어 시스템의 사용이 범용화 되면서 갑작스럽게 발생하는 전력기기의 고장은 큰 경제적 손실과 사회적 혼란을 초래하게 된다. 전력기기분야에 있어서 유입식변압기는 구조가 복잡하고 절연시스템도 액체와 고체절연체가 혼합되어 있어 다양한 형태의 감시진단기술을 요구하게 된다. 또한 고도성장기에 대량으로 설치된 대용량변압기가 경년 20년을 넘어서고 있으며, 앞으로도 장기사용된 변압기의 전체용량이나 대수는 증가할 전망이다. 그러므로 이와 같은 경년변압기를 장시간 건전하게 사용할 수 있는 것은 고장방지에 따른 경제적, 사회적 손실방지는 물론 변압기의 사용기간 연장에 따라 절연유와 같은 부존자원의 절약효과도 기대할 수 있다.

변압기는 1884년 GANZ사에 의해 처음으로 폐회로코아를 사용하여 120/70V, 1400VA를 개발되었으며 1890년에 AEG사의 M. O. Dolivo-Dobrowolsky는 3상변압기를 개발하였다. 같은 해에 Brown은 최초로 유입식변압기를 개발하였고 1891년에 Ferranti는 10kV/2kV의 변압기를 제작하였다, 1892년 규소관관을 사용하여 효율을 향상시킨이래 현재 유입식변압기는 1500kV 2000MVA를 목표로 연구되고 있다. 유입식변압기의 구성을 기능별로 분류하면 크게 절연기능, 냉각기능, 통전기능, 변성기능, 탭절환기능으로 분류할 수 있다. 절연기능은 고체절연물과 절연유의 성능이 영향을 미치고 있고 냉각기능은 철심의 성능이나 절연유의 종류, 냉각덕트의 구조 등에 주로 영향을 받는다. 또한 변성기능은 권선의 고장에 영향을 받고 탭절환기능은 탭절환기의 고장 등에 영향을 받는다. 변압기의 고장을 감시진단하기 위해서는 모든 기능을 감시해야 하지만 각 기능별 고장율과 경제적인 효과를 감안하여 감시 및 진단목표를 설정해야 한다. 또한 설정된 목표를 효과적이고 경제적으로 달성하기 위하여 체계적인 기술 로드맵을 설정하는 일은 매우 중요하다.

본 연구에서는 유입식변압기 감시진단을 위하여 전기설

2.1 국내 유입식변압기의 설치용량(대수)

국내에서 사용 중인 변압기는 산업체에서 관리하는 것과 한국전력에서 관리하는 것으로 분류할 수 있다. 산업체 관리 변압기의 현황을 살펴보면 154kV 변전소는 약 430여 개소, 22.9kV 변전소는 121,400여 개소로 조사되므로 154kV급 변압기는 1,000여대 정도로 추정되며, 22.9kV급 변압기는 300,000대 이상으로 추정된다. 한국전력의 변압기의 현황은 다음 그림 1과 같다. 그림 1의 변압기 현황은 한국전력에서 사용 중인 변압기만의 자료이다. 이 그림에서 송전급 변압기는 약 6대, 배전급 변압기는 약 160만대로서 전체 변압기는 154kV 이상급이 약 2,000대, 배전급이 약 200만대 정도임을 알 수 있다.

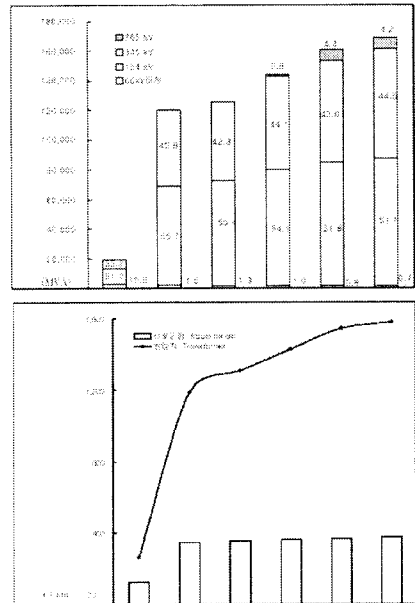


그림 1. 한국전력공사 유입식변압기의 설치용량(대수)

## 2.2 유입식 변압기 기술의 변천

### 2.2.1 고체절연물의 현황

유입식변압기의 권선절연이나 절연지저물로 사용되는 고체절연물의 현황을 나타내면 표 1과 같다. 표 1에서처럼 고체절연물은 설물로즈계통의 절연지와 프레스보드, 목재, 강화유리섬유 등이 있다. 유입식 변압기 절연에 절연유와 셀룰로즈계 재료가 적용된 역사는 오래되었으며 본질적으로 이 조합으로 UHV 절연까지 개발을 완료했다고 하는 사실은 유침 절연재료가 안정되고 성능이 우수하다고 생각할 수 있다.

표 1. 고체절연물의 종류

역체	절연유	경유, 합성유
고체	절연지	크라프트지, 크레이프지
	프레스보드	판, 울드, 적층형
	목재	목재, 적층목재
	기타	유리섬유, 레진 적층재

고체절연물은 변압기의 무게를 저감시키기 위하여 우수한 절연특성을 보유해야 하고 용량을 증가시키기 위하여 내열특성이 좋아야 하며 교류손실을 저감시키기 위하여 유전손을 낮추어야 한다. 그러므로 이러한 성능을 높이기 위하여 고체절연물의 고밀도화, 고내열지화, 저유전율화에 대한 연구가 꾸준히 수행되고 있다.

### 2.2.2 절연유의 변천

절연유는 유입식변압기에서 절연과 냉각기능을 수행하는 가장 중요한 요소이다. 따라서 그 성능을 개선하기 위하여 많은 변천과정을 보이고 있으며, 표 2는 그 과정을 보여주고 있다. 표 2에서와 같이 절연유는 크게 광유와 합성유로 분류할 수 있다. 일반적으로 광유를 사용하고 있지만 부하용량을 증가시키거나 변압기의 무게를 저감시키기 위하여 실리콘과 같은 합성유가 개발되어 사용되고 있고 최근에는 부족한 석유자원의 의존도를 낮추고 친환경성 절연유 사용을 위하여 식물유를 이용한 절연유 개발 연구가 수행되고 있다.

표 2. 절연유의 변천

연대	절연유
1919	광유
1939	염화디페닐
1941	
1944	대두유, 유채유
1949	광유+폴리이소부틸렌+로진
1950	
1955	오염화디페닐
1957	
1958	삼염화디페닐
1964	폴리부텐
1965	중질알킬벤젠
1967	알킬벤젠
1972	다환유(알킬나프탈렌)
1972	알킬디페닐에탄
	염소화디페닐
1973	실리콘유

## 2.2 변압기의 고장원인 분석

유입식 변압기가 정상적으로 운전되기 위해서는 변성기능과 통전기능, 절연, 냉각기능, 기계적인 강도 등의 성능을 보유해야 한다. 표 3은 유입변압기 부위별 이상현상 및 이상원인을 나타내었으며, 표 4에서는 유입변압기의 각구성부위 및 사용재료에 있어서 열화현상 등 탱크 내부에서의 열화현상을 나타내었다. 이러한 내용중 절연재료 열화의 지표로는 유중 용존가스의 변화, 절연유의 특성변화, 중합도의 저하, 진동 및 소음의 증가, 부분방전량의 증가가 있다.

표 3. 유입변압기의 이상현상 및 이상원인

부위	이상현상	이상원인	
내부	철심	과열	냉각불량, 누설자속, 조임의 느슨함
		진동증가	조임의 느슨함
	코일	과열	냉각불량
		방전	절연불량, 이상전압
		변형	단락 기계력
		리드선	과열
	절연물	방전	절연불량
		방전	경년열화, 이물혼입
		파손	경년열화
		절연유	방전
외부	탱크	누유	용접불량, 외부상처
	배관	파손	지진 등의 외력
	가스킷	누유	경년열화, 조임 불량
	애권	파손	지진 등의 외력
	냉각장치	누유	용접불량, 외부상처, 부식
부속기	냉각장치	냉각능력 저하	팬 고장, 펌프 모터 고장
	보호장치	오동작, 불동작,	흡수에 의한 절연저하, 단락,
	부하시템	오동작, 불동작,	피로에 의한 파손, 기계적 불량 등
	절환장치	이상절환	조작기구의 기계적 불량

### 2.3 유입식변압기 감시진단 시험

전항에서 언급한 바와 같이 변압기의 고장은 절연고장이 가장 많으며 절연성능을 증가시키기 위하여 절연유와 절연지는 많은 변화과정을 보여 왔다. 또한 표 3과 표 4에서도 절연열화의 지표로서 유중가스와 절연지의 중합도 부분방전이 주요 인자인 것으로 나타났다. 이러한 특성을 바탕으로 현재 유입식 변압기에서 주로 사용되고 있는 열화 감시진단 방법은 표 5와 같다.

표 5에 따르면 시험법은 크게 전기적인 방법과 비전기적인 방법으로 분류할 수 있다. 전기적인 방법으로는 절연특성을 측정하는 부분방전 시험법과 교류 및 직류 누설전류 측정법 그리고 그 외의 권선의 기계적 특성을 측정하는 진단법으로 분류할 수 있다. 이 중에서 온라인 진단이 가능한 시험법은 부분방전시험법인 것으로 나타났다. 부분방전시험법은 현재 신호측정과 잠음판별, 위치추적을 목적으로 부싱탭이나 접지선전류를 이용한 전기적인 방법과 초음파센서를 이용한 초음파법을 병용하여 사용되고 있으나 이러한 방법은 시스템이 복잡하고 비경제적이기 때문에 범용적인 사용이 제한되고 있다. 비 전기적인 방법으로는 주로 화학적인 방법으로 절연유 유지보수를 위한 시험법 중 가장 많이 사용되고 있는 유중가스분석법 그리고 절연지의 기계적인 강도를 측정하는 평균중합도, 절연유의 전기적특성과 화학적 특성을 측정하는 절연유분석시험으로 분류할 수 있다. 이 중에서 최근 유중가스분석법은 온라인으로 다 성분 가스나 수소가스를 측정하는 것이 가능해 졌고 현장에서 적용되고 있지만 비경제적이라는 점 때문에 보편적으로 사용되고 있지 않다. 이상과 같은 관점에서 볼 때 유입식 변압기의 감시진단기술 로드맵은 온라인 측정이 가능한 부분방전측정과 유중가스진단을 대상으로 하고, 이들 진단법의

보편적인 적용을 위하여 기존의 온라인 진단법이 가지고 있는 기능과 성능을 보유하고 있으며 경제적이고 큰 유지보수기술을 필요로 하지 않는 방향으로 설정하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

표 4. 유입변압기의 내부 열화 현상

구	구성 부위		열화 현상				
	구성 부품	재료	종류	영향	지표		
내	철심	철심절연	마닐라지, 프레스보드	열화	기계적강도저하 진동증가	진동 및 진동의 변화	
		도체절연	크리프트지	열화	절연을 없애는 1. 기계적강도 저하 → 절연파괴 → 진동증가	1. 유중용준 가스의 변화 2. 절연지의 중합도 저하	
	권선	권선절연	크리프트지, 프레스보드	열화	2. 가연성 가스 발생	3. 절연지의 기계적 강도 저하	
		코일지지물	목재, 프레스보드	부분방전 열화			
리드선	도체절연	크리프트지	부분방전 열화				
	리드지지물	목재, 프레스보드	부분방전 열화				
부	절연유	전기절연유	유화, 부분방전열화, 흡습	절연내려져하 부분방전발생 → 가연성 가스 발생 → 절연파괴	1. 절연파괴진입 2. 유중가스변화 3. 유중수분증가 → 절연파괴진입		
		절연유	전기절연유	유화, 부분방전열화, 흡습	1. 절연파괴진입 2. 산기변화		
필터	정확자	동, 동합금	마모, 부식(유화물)	정확연 손실 정확저항증가 과열 및 등온	1. 절연회수 2. 정확저항 3. 정확상태 4. 동작 토오프		
		정확자	동, 동합금	마모, 부식(유화물)	정확연 손실 정확저항증가 과열 및 등온		

키기 위한 인공지능기술의 개발을 목표로 하고 있다. 분석기술에서는 유중가스특성을 이용하여 절연지의 수명을 추정하거나 비전분기라도 고장원인이나 고장부위, 고장위치 등을 판별할 수 있는 지능형 분석기술의 개발을 목표로 하고 있다. 마지막으로 장치기술에서는 안테나를 이용한 온라인 부분방전측정장치와 가스센서를 이용한 온라인 유중가스측정장치의 개발을 목표로 하고 있다. 이상과 같이 설정된 기술의 개발을 위하여 각 기술을 더욱 구체화시켜야 할 것으로 사료된다.

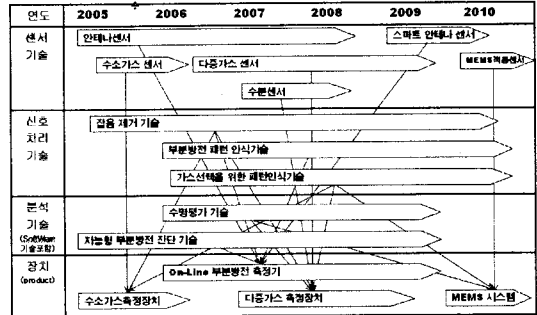


그림 2. 유입식변압기 감시진단기술 로드맵

표 5. 변압기의 감시 진단기술

대	요소핵심기술명	기술의 내용	On-Line
전	부분방전시	전기신호 검출	○
		초음파신호 검출	○
	누설전류측	직류누설전류 측정	×
		교류누설전류 측정	×
	유전점진시	Tanδ 측정	×
		유전손실 측정	×
	RVM	외부전압측정	×
	그외	권선저항측정	×
		여자전류측정	×
		전선비 측정	×
비	유중가스	절대치 평가	○
		가스조성비 평가	
		가스구성패턴 진단	
	절연지시형	평균중합도	×
	절연유시형	전선가	×
		내전압시간	×
		고유저항률	×
수분량측정		○	

### 2.4 기술로드맵

'23항에서 설명한 바와 같이 부분방전과 유중가스분석기술을 대상으로 설정한 기술로드맵은 그림 2와 같다. 그림 2에서와 같이 기술은 크게 센서기술과 센서에서 측정된 신호를 진단에 필요한 정보량으로 처리하는 신호처리기술, 처리된 신호를 고장을 예측하거나 진단하는 분석기술, 이러한 과정을 수행하는 장치기술로 분류하였다. 먼저 유중가스센서 기술에서는 최근 나노기술과 반도체기술의 발전과 더불어 개발되고 있는 가스센서를 이용하는 것으로 설정하였고, 부분방전기술은 높은 감도의 신호검출은 물론 외부잡음의 저감과 위치추정이 가능한 안테나법을 이용하는 것으로 하였다. 신호처리기술에서는 주파수변환이나 웨이브렛 등을 이용한 외부잡음처리를 대상으로 하였고 처리된 신호를 이용하여 유중가스분석에서 목표가스를 선택하거나 정량화하고 또한 고장종류를 패턴화

### 3. 결 론

유입식변압기의 용량이나 대수는 해마다 증가하고 있으며 20년이상 장기 사용된 변압기도 증가추세에 있다. 이러한 시점에서 변압기의 고장을 예방하고 수명을 추정하는 범용적 기술은 사회적 혼란을 방지하고 국가경제에 도움이 될 것이다. 본 연구에서는 진단연구회에서 목표로 하고 있는 유입식 변압기 진단기술 로드맵에 대하여 검토 분석하였다. 대상으로한 진단기술은 온라인 진단기술로서 안테나를 이용한 부분방전측정기술과 가스센서를 이용한 유중가스분석기술로 하였다. 이러한 기술은 크게 센서기술과 신호처리기술, 분석기술, 장치기술로 분류되었으며, 향후 각 기술은 개발연구의 수행을 위하여 더욱 구체화해야 할 것으로 생각한다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 한국전력공사, "한국전력공사 송변전설비용량 통계자료", 2003
- [2] "전력기기 절연의 실제", 개발사, 1981
- [3] Danick Briand, Bart van der Schoot, Nicolaas F. d eRooy, Senior Member, IEEE, Hans Sundgren, and Ingemar Lundstrom, Member, IEEE, "A Low-Power Micromachined MOSFET Gas Sensor", Journal of Microelectromechanical Systems, Vol.9, No.2, September 2000
- [4] Parag M. Bajarria and Bruce E. Segee, "A Study of the Application of the CMAC Artificial Neural Network to the Problem of Gas Sensor Array Calibration", NSF
- [5] E. Gulski, "Computer-aided Measurement of Partial Discharge in HV Equipment of Partial Discharge in HV Equipment", IEEE Trans. Electr. Insul., EI-28, No. 6, 1993