

## 유입식 변압기의 열화진단에 관하여



**김광화**  
한국전기연구소 절연진단팀  
팀장(책임연구원)

### 1. 머릿말

우리나라의 산업의 발전에 따라 전력수요는 1970년대의 중화학 공업의 발전과 아울러 급속히 성장하였고, 최근에는 공장 자동화와 맞물려 전력수요의 증대와 전력공급의 고신뢰성 및 전력품질 제고를 요구하고 있다. 그리고 전력설비의 증대에 따른 용지를 확보하기 어려워 전력설비의 신증설이 쉽지가 않으며, 증설에 비용이 많이 소요되는 현상이 나타나고 있다. 또한 많은 변전소 및 발전소의 보수 유지의 관리에 있어서도 소요되는 비용이 점차 증가하고 있어 효율적인 관리가 필요하고, 고신뢰성을 유지할 필요가 있다. 오늘날 우리 사회에서 문제가 되고 있는 3D 현상과 같이 힘들고 어려운 일을 기피하고 있어 전문인력의 양성도 어려운 실정이다.

또한 사회적으로 주민들의 민감사항으로 되고 있는 소음 및 환경공해에 대처하기 위하여 변전소 및 발전소와 주변경관과의 조화, 소음레벨의 저감, 불연화, 난연화등의 방재상 배려도 요구되고 있다.

우리의 현실은 사회적인 면에서 선진국에 진입하는 단계로 전력수요는 고품질 고신뢰성을 요구하고 있으나, 전력공급 측면에서는 전력기들이 신설한지 20년이 지난 것이 많이 있어 신뢰성 면에서 열악한 편이며, 초기 설치시 경제성 문제로 인하여 설비의 단가저하로 전력기기의 신뢰성이 떨어지는 형편에 있으며, 유지 및 보수에 관한 것도 체계적인 연구가 이루어지지 않아 우리의 현실과는 거리가 있는 실정이다.

국내의 전력기기 생산업체의 실태에서도 중소기업이 대부분이고 이들 업체는 기기의 설계 등에 관한 전문인력의 확보가 어려우므로 고품질 전력기기의 개발이 힘들며, 대기업에서도 조차 현재 생산하고 있는 전력기기는 이미 외국에서 뒤진 기술을 도입하여 생산하고 있으나, 이 기술도 실질적인 설계 기술이 아닌 생산기술에 불과하여 설계를 위한 실질적인 기술은 부재상태이고, 기술개발에 대한 개념보다는 생산 비용의 저감에만 집중되어 오히려 초기의 제품보다 신뢰성을 떨어

지게 할 수 있는 요인으로 작용하고 있는 것으로 사료된다. 그러므로 개방체제의 세계속에서 우리의 기업이 유지 발전하기 위해서는 현재의 전기기기에 진단의 개념이 도입된 인텔리전트화한 기기의 개발이 필요한 실정이다.

또한 전력기기의 운전에서도 감시진단에 의한 운전 보수의 합리화를 들 수 있다. 감시진단에 의한 운전보수의 합리화를 위해서는 변전소의 보수와 운전경비를 절감화하는 방안인 컴퓨터 등을 이용하여 지식베이스를 구축한 전문가 시스템이 등장하여 운전 및 보수업무의 효율을 높이고, 고장 미연방지를 위한 진단시스템의 구축과 고장시 고장조치와 복구의 효율성 증대에 이용되고 있다.

본 고에서는 전력기기 중에서 가장 중심이 되는 전력용 변압기에 대한 열화의 특성과 이의 진단방법에 대하여 소개하고자 한다.

### 2. 전력기기에서 절연열화기구

#### 가. 전력기기의 절연시험

전기설비의 절연성을 검정하는 시험은 다음 경우에 절연내력 시험과 절연특성 시험으로 크게 분류하는 것이 가능하다.

#### 1) 절연내력시험

##### (1) 교류전압시험

- (2)뇌임펄스시험
- (3)개폐임펄스시험
- (4)직류전압시험

**2) 절연특성시험**

- (1)직류절연특성시험
- (2)유전정접시험(tanδ)
- (3)교류전류시험
- (4)부분방전시험

절연특성시험은 제작과정에서 기기절연의 품질관리를, 운전중에서 이러한 절연의 보수관리를 행하기 위한 것으로 된다. 또한 절연 내력시험의 목적은 상용주파전압, 뇌 임펄스전압 개폐임펄스전압 등의 전압에 대해서 설비가 지정된 이상의 절연 강도를 갖고 있는가를 검증하는 것으로 된다.

**나. 전력기기의 절연열화 기구**

전력기기에서 일반적으로 열화의 원인이 되는 것은 열 스트레스, 전압 스트레스, 기계 스트레스 및 환경 스트레스 요인으로 나눌 수 있고, 일반적으로 열화는 위 요인들의 복합적인 작용에 의해 진행된다.

**1) 열 스트레스 열화요인**

온도상승은 절연재의 화학반응을 촉진하여 열화속도를 증대시키고, 수명을 단축하는 일반적인 열화요인으로 된다. 기기의 온도상승 한계도 소재의 열열화의 관점에서 결정되며, 열스트레스에 의해 소재는 물리적 화학적으로 변하여 전기적, 기계적 성능이 저하된다.

**2) 전압 스트레스 열화요인**

소재에 전압인가로 기인한 전도전류에 의한 주열열 발생, 유전체 손실에 의한 열적효과, 단락 대전류나 고전압에 의한 기계적 효과 및 부분방전에 의

한 열적 입자 충격 작용과 여기분자 및 이온에 의한 화학작용이 발생하여 절연재가 열화된다.

**3) 기계 스트레스 열화요인**

이것은 기계적응력, 진동이 중심되고 외부에서 인가되는 기계력 이외에 열팽창계수의 다름에 의한 열응력, 단락전류에 의한 전자응력 등에서 유발된다.

**4) 환경 스트레스 열화요인**

절연재는 원자로내 방사선 원소 혹은 입자가속기에 의한 고에너지 방사선의 환경하에 있어서는 물리적, 화학적 열화가 촉진된다. 또한 흡수에 의한 가수분해 또는 미생물에 의한 침식도 주목되고 있다.

**다. 진단기술의 개요**

전력기기의 보수 유지의 흐름은 종래의 시간기준정비(Time Base Maintenance)에서 상태기준정비(Condition Base Maintenance)개념으로 바뀌고 있으며, 시간기준정비에서도 사용기기의 변천과 전력수요의 특성변화로 인하여 종래의 기준을 적용하는 것은 경제적 신뢰성 측면에서 바람직하지 못하다. 따라서 새로운 기기에 알맞는 보수유지 기법과 상태진단 기술발전에 의한 기기의 보수유지에 효율적 합리적으로 대처하고, 신뢰성을 높이는 데 역할을 할 수 있도록 연구개발하고 있는 상태이다.

현재의 변전설비의 보수유지는 외관 구조점검을 주체로 한 시간기준정비에 의한 정기적인 부품교환이나 정비에 의한 예방정비가 주이지만, 실제로는 고장 발생후 그 부위를 정비하

는 고장후 정비가 많은 비중을 차지하고 있다. 따라서 기기의 상태를 진단하여 사전에 미리 정비하는 자동 감시진단 시스템, 운전 정비시스템의 구축이 필요로 한다. 자동 감시진단시스템의 도입에 따라 기대 가능한 기능 및 효과는 다음과 같다.

이의 도입에 따라 사고 예지 및 조기 복구가 가능하여 설비의 사용 효율을 높일 수 있고, 고품질적인 전력공급이 가능하고, 신뢰성향상을 할 수 있으며, 이 결과로 설비의 유효 사용기간에서의 운전 및 보수에 있어서 전체적인 비용을 저감할 수 있어 경제성을 도모할 수 있다. 그리고 종래에는 전력기기의 유지시간 기준형으로 예방 유지를 하였으므로 기기의 남은 수명이 파악되지 않기 때문에 불필요한 손실이 발생하고, 수명이 남아 있는 부품도 교환하게 되는 경우도 많다. 이와 같이 자동감시 시스템과 운전업무 및 보수업무 지원 시스템을 구축하면 전력기기의 고성능 고기능화 할 수 있는 인텔리전트(Intelligent) 시스템이 가능하게 될 것이고, 설비의 원방집중감시 및 제어가 가능하므로 무인화 추진이 가능하게 된다. 따라서 전력기기의 전반에 걸쳐서 전체적인 유지 비용의 절감과 전력공급의 고신뢰성화 및 고품질화를 추구할 수 있는 잇점이 있으며, 전문인력의 부족을 메꿀 수 있는 방안이 된다.

그러나 이상과 같은 감시진단 기술은 아직 연구단계이며, 실용화는 일부 되어 있는 상태이고 신뢰성면에서 아직은 문제가 남아 있다. 이 기술을 적용할 때 단순히 감각적으로 범위를 선정하면 실제로 얻는 결

과와 차이가 크게 나타나므로 적용전에 치밀한 검토를 한 후에 전력사용자의 여건에 따라 적용범위를 적절히 선택해야만이 경제적 실질적 이득이 있을 것으로 사료된다. 그리고 단순히 기존 전력기기의 비용과 감시진단기술 적용의 비용을 대비한다면 경제성이 없는 것이 일반적이지만, 불시적인 고장으로 인한 손실면에서 충분히 경제성이 있는 것으로 나타나고 있는 경우가 많다.

### 라. 기기의 수명 및 신뢰성 특성

일반적으로 전력기기에서 수명을 좌우하는 것은 여러가지가 있겠지만, 특히 절연의 수명점을 기기의 수명점으로 고려할 수 있다. 왜냐하면 일반적으로 전력기기중 구동부가 있는 기기는 구동부의 마모나 파괴시 그 부분만을 보수하여 사용하는 것이 가능하나, 절연물은 전반적으로 충전되어 있어 일부의 열화시는 절연물을 전부 교체하던가 새로운 기기로 대체하여야 하므로 일반적으로 절연물의 수명점이 전력기기의 수명점이 된다.

IEC - 216에서 절연물의 일반적인 수명점은 "절연파괴전압 초기치의 50%인 점"으로 정의하고 있다.

일반적으로 전력기기에서 신뢰성 곡선은 그림 1과 같이 나타나고, 초기치의 50% 이하에서는 수명기에 들어가며 이 단계에서 열화의 진행도는 급속히 이루어지고 있다. 예를 들면 회전기의 절연설계는 정격전압의 4 - 5배에서 설계되며, 수명점은  $X - 3\sigma$  값( $X$  : 평균절연파괴전압,  $\sigma$  : 표준편차)인 점으

로 하며 이 값은 초기치의 40%에 해당하고 이 시점에서 교체를 하는 것이 타당하다고 보고되고 있다.

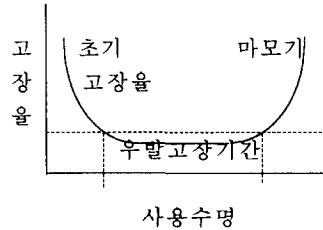


그림 1. 신뢰성 Bathtub 곡선

그림 1과 같이 마모기에 들어서면 사고날 확률이 급속히 증가하므로 여기서 감시진단기술을 활용하여 예방정비를 하면 어느정도 낮은 고장률로 장시간 사용이 가능하므로 경제적인 전력설비를 관리하는 것이 가능하다.

### 3. 변압기의 진단방법

현재 변전기기에 이용되는 고압 변압기는 유입변압기이며, 유입변압기의 수명은 열적인 열화와 절연재료가 녹서지 및 개폐서지 등의 이상전압 또는 외부단락 등의 전기적, 기계적 스트레스에 의한 열화로 결정되고, 파괴할 위험도가 증대할 시점에 대한 열화문제를 고려하는 것이 예방보수 차원에서 매우 중요하다. 유입변압기는 각종의 재료가 이용되고 있지만 전기적 성능면에서 절연유, 절연지, 프레스보드 등의 절연재료 열화가 주요한 문제가 되므로, 이들 절연재료의 열화형태와 최근 진단기술에 대하여 기술한다.

#### 가. 열화요인과 형태

절연유를 이용한 전력기기에서

발생되는 열화요인으로는 고온 운전에 따른 열적열화, 외부단락에 기계적 손상 및 부분방전열화

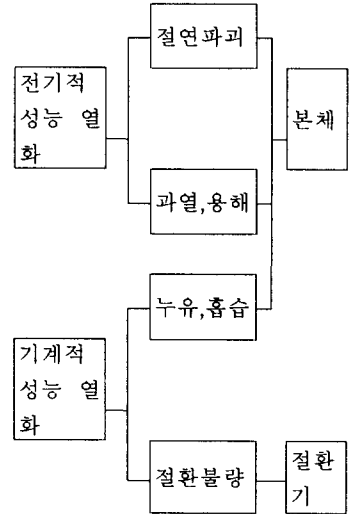


그림 2. 유입변압기의 열화와 장애의 관계

가 대표적이며 이로 인하여 전기적 성능과 기계적 성능이 저하하게 된다. 이러한 열화에 의하여 이들 전력기기에서는 기계적 강도 저하, 진동 증가, 가연성 가스 발생 등이 나타나고 절연파괴로 진전된다.

이러한 열화요인 외에 산화, 흡습, 기계적 응력 및 환경적 요인에 의하여 복합적으로 열화가 진행되어 이상이 발생하고 사용수명에 도달하게 된다. 그림 2는 열화에 따른 주요 장애 관계를 나타낸 것이다.

표 1은 유입변압기 부위별 이상현상 및 이상원인을 나타내었으며, 표 2에서는 유입변압기의 각구성부위 및 사용재료에 있어서 열화현상중 탱크 내부에서의 열화현상을 나타내었다. 이러한 내용중 절연재료 열화의 지표로는 유중 용존가스의 변화, 절연

표 1. 유입변압기의 이상현상 및 이상원인

내부			외부		
부위	이상현상	이상원인	부위	이상현상	이상원인
철심	과열	냉각불량, 누설자속, 조임의 느슨함	탱크	누유	용접불량, 외부상처
	진동증가	조임의 느슨함		배관	파손
코일	과열	냉각불량	가스킷	누유	경년열화, 조임 불량
	방진	절연불량, 이상전압		배관	파손
리드선	과열	냉각불량, 접속부 조임 불량	냉각장치	누유	용접불량, 외부상처, 부식
	방진	절연불량		냉각능력 저하	팬 고장, 펌프 모터 고장
절연물	방진	경년열화, 이물혼입	보호장치	오동작, 불량	흡수에 의한 절연저하, 단락,
	파손	경년열화		동작, 지시 불량	피로에 의한 파손, 기계적 불량 등
절연유	방진	경년열화, 수분혼입	부하시 탭 절환 장치	오동작, 불량	조작기구의 전기적 불량, 조작기구의 기계적 불량

유의 특성변화, 중합도의 저하, 진동 및 소음의 증가, 부분방전량의 증가가 있다.

절연재료중 절연지의 열화도는 셀룰로오스 분자를 만들고 있는 글루코스의 수(평균중합도)로 나타낼 수 있다. 열화가 진행되면 셀룰로오스 분자는 저분자량화로 되며, 이것은 평균중합도 저하로 나타나고 인장력 세기(항장력)의 저하를 가져온다. 예를 들면 약 30년 운전한 유입변압기 권선에 사용된 절연지의 평균중합도는 일반적으로 초기치의 40 - 60%로 저하되어 간다. 그림 3에 운전년수와 평균중합도와의 관계를 나타내었다. 그림 4는 장기간 운전한 유입변압기에서 채집한 절연지 및 프레스보드의 평균중합도와 항장력의 관계를 표시한 것이다. 이러한 시험결과에서 절연지는 경년 열화에 의해서 평균중합도 및 항장력은 저하하지만 절연파괴전압은

거의 저하하지 않는다는 것으로 밝혀졌다.

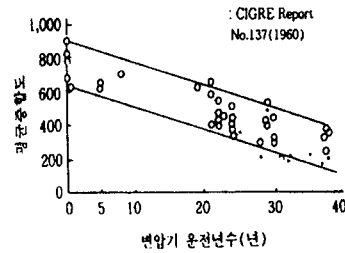


그림 3. 운전년수와 평균중합도의 관계

#### 나. 진단기술

변압기에 사용되는 진단기술은 다음 표 3과 같이 대표적으로 나타나며, 이 표에서는 적용분야, 현재의 상태 및 효과에 관하여 나타냈다. 이 중 대표적인 진단기술에 대하여 다음에서 설명하고자 한다.

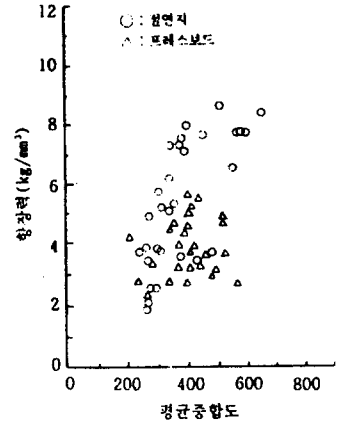


그림 4. 평균중합도와 항장력의 관계

#### 1) 유증 가스 분석에 의한 진단

변압기 내부에 국부적인 가열 및 부분방전이 발생하면 절연유 및 절연지가 분해되어 여러종류의 가스가 발생한다. 이 분해 가스는 절연유에 용해되므로, 유증용존가스를 Gas chromatography

표 2.. 유입변압기의 내부 열화 현상

구 성 부 위			열 화 현 상		
구 성 부 품		재 료	종 류	영 향	지 표
내	철심	철심절연	열열화	기계적강도저하 진동증가	잡음 및 진동의 변화
	권선	도체절연			
		권선절연	목재, 프레스보드		
		코일지지물		부분방전 열화	2. 가연성 가스 발생
	리드선	도체절연	목재, 프레스보드		
		리드지지물			
절 연 유		전기절연유	열열화, 부분방전 열화 흡습	절연내력저하 부분방전발생 →가연성가스 발생 →절연파괴	1. 절연파괴전압 2. 유중가스변화 3. 유중수분증가
부 하 시 탭 절환기	절연유	전기절연유			1. 절연파괴전압 2. 산가변화
	접촉자	동, 동합금	마모, 부식(유화동)	접촉면 손상 접촉저항증가 과열 및 용손	1. 절환회수 2. 접촉저항 3. 접촉상태 4. 동작 토오크

로 분석하여 가스성분, 발생량, 경시변화를 파악하여 변압기의 열화 진전상태를 판단할 수 있다.

일본의 전기협동연구 36-1에서는 변압기의 이상종류와 발생가스의 관계, 가스분석 결과의 판정방법을 3종류(① 각 성분 가스에 의한 판정, ② 가연성 가스 총량 및 각 가스 량에 의한 판정, ③ 가연성 가스 총량의 증가 경향에 의한 판정)로 나타내었다. 가스분석 결과를 이용한 진단방법으로는 ① 가스패턴에 의한 진단방법, ② 조성비에 의한 진단방법, ③ 특정가스에 의한 진단방법에서 유효성이 높은 것으로 되어 있다. 변압기 이상에 따른 발생가스 성분을 표 4에 나타내었다. 유중가스 분석 진단장치에

는 Gas chromatography 외에 수소가스 상시감시장치와 다종류가스 자동분석장치 등이 있다.

### 2) 부분방전 측정에 의한 진단

부분방전에 의하여 절연물이 열화하면, 절연이 파괴될 위험성이 높은 시점의 수명을 고려해야 한다. 부분방전에서 절연물 수명의 관계는 그 크기와 절연구조 및 전계 값에 의한 영향을 받기 때문에 이를 고려해야 한다.

부분방전 검출법은 변압기 외함벽에 부착한 초음파 마이크를 이용한 음향법, 부분방전에서 발생된 전류펄스를 중성점 접지선에 취부한 Rogoski coil 및 Bushing tap으로 부터 검출한 전

류법을 병행한 자동감시 진단장치가 개발되어 있다. 이것은 운전중의 변압기에 있어서는 외부

잡음이 많아서 음향법이나 전류법 단독으로는 변압기의 부분방전 검출이 곤란하기 때문에 두가지 방법을 조합하여 내부방전을 판단하는 기능을 갖도록 한 진단장치이다.

### 3) % Z 변화 측정에 의한 진단

변압기에 2차 단락이 일어날 경우에는 단락전류에 의해 코일이 변형되어 코일간 gap의 증가현상에 의해 리액턴스가 증가하게 된다. 그러므로 변압기의 % Z를 측정하여 그 변화량을 관측

표 3. 변압기에서 적용되는 진단기술

원인	진단기술	기기의 운전조건	진단기술의 상태	진단기술의 유효성
기계적	1. 여자전류	OFF-S	A	M
	2. Low Voltage Impulse	OFF-S	A	L
	3. Frequency Response Analysis	OFF-S	B	L
	4. Leakage Inductance Measurement	OFF-S	A	M/H
	5. Fourior Analysis	ON	C	?
열 적	유증가스분석			
	6. Gas Chromatography	ON	A	H
	7. Equivalent Hydrogen Method	ON	A	M
	절연지 열화			
열 적	8. Liquid Chromatography-DP Method	ON	B	L/H
	HOT SPOT DETECTION			
	9. Invasive Sensor	ON	B	L
유전적	절연유분석			
	10. Moisture, Electric Strength, Resistivity, etc.	ON	A	M
	11. Turn Ratio	OFF-S	A	L
	부분방전 측정			
	12. Ultra Sonic Method	ON	B	M/H
	13. Electric Method	ON	B	M/H
	14. Loss Angle Measurement	OFF-S	A	M
* OFF-S : 현장에서 운전중지중      A : 일반화된 것      H : 유효성 높음 OFF-L : 실험실에서 운전중지중      B : 개발중 상태      M : 유효성 중간 ON : 운전중      C : 연구단계      L : 유효성 낮음 ? : 유효성 의문				

하면 코일의 상태가 추정되므로 변압기의 이상을 진단할 수 있다.

**4) 진단결과에 의한 변압기의 평가**

앞에서 기술된 진단방법에 의해 얻어진 결과를 정리하면 절연지의 중합도와 열화의 관계로 부

터 다음과 같이 정리된다.

(i) 평균중합도 및 항장력은 40년 동안에 50% 저하한다.

(ii) 약 30년 동안 운전된 초고압 유입변압기에 있어서 프레스보드의 평균중합도는 조사 결과 200 - 600 정도이다.

(iii) 일반적으로 평균중합도 (평균중합도의 초기치에 대한

값)가 40 - 50% 된 경우를 수명으로 판단한다.

(iv) 1g 당의 (CO<sub>2</sub> + CO) 가스 생성량이 0.42 - 1.7 ml/g으로 되면 절연지의 사용 수명한계에 이른 것으로 고려한다(그림 5).

그리고 변압기의 절연유에 대한 평가방법은 가스분석, 전산

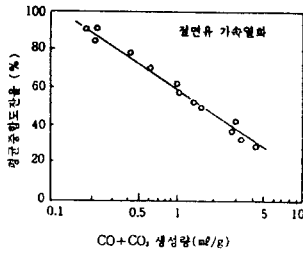


그림 5. (CO<sub>2</sub> + CO) 가스 생성량과 평균중합도 잔울의 관계

표 4. 유입변압기 이상에 따른 발생가스 성분

이상의 종류	주요 발생 가스
절연유 의 과열	H <sub>2</sub> , *CH <sub>4</sub> , *C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , *C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
유침 고체절 연물의 과열	*CO, *CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , *C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , *C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
절연유 중의 방 전	*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>3</sub> H <sub>6</sub> ,
유침 고체절 연물의 방전	*CO, *CO <sub>2</sub> , *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>3</sub> H <sub>6</sub>

주) \* 표시는 특정발생 가스 임.

표 5. 전산가에 의한 판정

신 유	0.02 미만
초고압 변압 기유	0.2 미만이면 양호
33kV 이하의 변압기유	0.3 미만이면 양호
얼마 안 있어 서 재생 또는 교환을 요하는 유	0.3 - 0.5
긴급히 재생 되는 교환을 요하는 유	0.5 초과

표 6. 절연 파괴 전압

66kV 이상 변압기로 유와 공기가 직접 접촉하지 않는 것	35kV 초과
그 이외의 것	30kV 초과

가 및 절연내력으로 평가하며, 앞에서 설명되지 않은 전산가 및 절연내력의 평가기준은 다음 표5 및 표6과 같다.

#### 4. 끝맺는 말

본고에서는 현재 가장 유력하게 사용할 수 있는 변압기 진단 기술에 관하여 기술하였다. 이 기술들은 주로 운전 정지 후에 가능한 기술들이 대부분이며, 이들이 가장 변압기의 진단에서 근간이 되는 기술이다. 향후 변압기에 대한 운전중 진단방법이 개발되어 확대 적용될 전망이다. 따라서 이들에 관한 연구가 산업체, 학계 및 연구소에서 많이 이루어져야 할 것으로 생각된다.

< 이준호 위원 > < 김정태 위원 >